

早稲田大学審査学位論文  
博士（スポーツ科学）

## エラーモニタリングに及ぼす罰と報酬の効果

The effects of punishment and reward on error monitoring

2016年7月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

丸尾 祐矢

MARUO, Yuya

研究指導教員： 正木 宏明 教授

## 目次

	Page
序文	i
表一覧	ii
図一覧	iii
略語一覧	iv
第1部 序論	1
第1章 行動指標によるエラーモニタリング研究	2
第2章 事象関連電位によるエラーモニタリングの研究	4
第3章 正反応におけるエラーモニタリング	11
第4章 情動・動機づけ処理とエラーモニタリング	13
第5章 エラーモニタリングと個人差	16
第6章 本研究の目的	21
第2部 実験1 聴覚性罰がエラーモニタリングに及ぼす影響	23
第1章 目的	23
第2章 方法	23
第3章 結果	27
第4章 考察	31
第3部 実験2 金銭罰がエラーモニタリングに及ぼす影響	36
第1章 目的	36

第2章 方法	37
第3章 結果	40
第4章 考察	45
第4部 実験3 金銭罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響	48
第1章 目的	48
第2章 方法	49
第3章 結果	51
第4章 考察	58
第5部 総合論議	61
第1章 罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響	62
第2章 エラーモニタリングと性格特性の関連性	65
第3章 エラーモニタリングの脳内機序	66
第4章 今後の展望	67
引用文献	69

## 序文

本博士学位論文の一部は以下の論文で発表した

1. 丸尾祐矢・正木宏明 (2014) パフォーマンスモニタリングに及ぼす聴覚性罰刺激の効果. 生理心理学と精神生理学, 32, 29-40.
2. Maruo, Y., Schacht, A., Sommer, W., & Masaki, H. (2016). Impacts of motivational valence on the error-related negativity elicited by full and partial errors. *Biological Psychology*, 114, 108-116.

表一覧

Table		Page
2-1	BIS/BAS と行動指標及び生理指標の相関係数	30
4-1	各条件における ERN と Pe 振幅値	54

## 図一覧

Figure		Page
1-1	ERN と Pe の模式図とその頭皮上分布	5
2-1	空間ストループ課題の手順	25
2-2	平均反応時間(a), エラー率(b), 遅延反応率(c)の条件間比較	28
2-3	FCz, Cz における反応同期 ERP の条件間比較	29
2-4	罰条件と統制条件における Pe 振幅値と BAS 得点の相関図	31
3-1	Go/No-go 課題の手順	38
3-2	FCz, CPz における EMG 同期 ERP の条件間及び試行間比較	42
3-3	FCz, CPz における刺激同期 ERP の条件間及び試行間比較	44
4-1	平均反応時間(A), EMG 反応時間(B), エラー率(C)の条件間比較	52
4-2	FCz と CPz におけるエラー反応同期 ERP の条件間比較	55
4-3	FCz と CPz における部分エラー同期 ERP の条件間比較	56
4-4	各条件における ERN 振幅値と BAS 得点の相関図	57

## 略語一覽

ANOVA	analysis of variance
BAS	behavioral activation system
BIS	behavioral inhibition system
EEG	electroencephalogram
EMG	electromyogram
EOG	electrooculogram
ERP	event-related potential
ERN	error-related negativity
Hz	Hertz
M	mean
ms	millisecond
$\mu$ V	microvolt
Pe	error positivity
R	response
RT	reaction time
S	stimulus
SEM	standard error of mean

## 第1部 序論

我々は、実際に起きた行動と目標とする行動の差を検出し、評価し、修正することができる。この脳内情報処理過程は、エラーモニタリングという概念に包括され、生理心理学的手法によって検討が行われてきた。エラーモニタリングには、2つの情報処理過程があると考えられている。エラーした際にそのエラーを検出する過程と表出したエラーを評価する過程である(Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band, & Kok, 2001)。エラーモニタリングは、事象関連電位(event-related potential: ERP)であるエラー関連陰性電位(error-related negativity: ERN, Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990; Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1990)とエラー陽性電位(error-positivity: Pe, Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1991)によって検討されてきた。ERNは、エラー反応後約100–150 msに最大振幅を示す陰性電位であり、Peはエラー反応後約200–500 msに中心–頭頂部で最大振幅を示す陽性電位である。ERNはエラーモニタリングにおけるエラー検出を反映し、Peはエラーモニタリングにおけるエラー評価を反映すると考えられている(Falkenstein et al., 1991; Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993; Nieuwenhuis et al., 2001)。これまで四半世紀に渡り、エラーモニタリングに関する研究はPeよりもERNに焦点をあてたものがほとんどだった。近年では情動・動機づけ処理の観点からエラー検出機能は明らかにされつつある。しかしながらPeの機能的意義については、ERNほど明らかになっていない。エラーを検出するだけでは、誤った行動を適正な行動に修正することは難し



い。検出したエラーを脳内でどのように評価しているのか。エラーモニタリングを包括的に明らかにするためには、Pe の機能的意義を明らかにする必要がある。本章では、ERN, Pe に関する先行研究を概観し、本研究の目的を述べる。

## 第1章 行動指標によるエラーモニタリング研究

初期のエラーモニタリング研究は行動指標によって検討されてきた(e.g., Rabbitt, 1966)。エラー反応が解析対象となるため、エラー反応を誘発する課題が考案されてきた。主に用いられてきた課題に、フランカー課題、空間ストループ課題、Go/No-go 課題がある。

フランカー課題は、標的刺激とノイズ刺激が提示され、標的刺激に対応する手で反応する課題である(Eriksen & Eriksen, 1974)。例えば、実験参加者は標的刺激が H ならば右手で、S ならば左手で反応することが求められる。標的刺激はノイズ刺激に挟まれて提示される。標的刺激とノイズ刺激が一致する場合(HHHHH, SSSSS)は、反応が容易であるが、標的刺激とノイズ刺激が一致しない場合(HHSHH, SSHSS)は、反応時間が遅くなり、エラー反応が増大する。空間ストループ課題は、注視点が提示された後、注視点の上または下に提示される矢印の方向に対応する手で反応する課題である(Masaki & Segalowitz, 2004)。例えば、実験参加者は上向きの矢印が提示されたら上の手で、下向きの矢印が提示されたら下の手で反応する。矢印の提示位置と提示方向が一致する場合は反応が容易であるが、矢印の提示位置と提示方向が一致しない場合、反応時間が遅くなりエラーが増大する。Go/No-go 課題では、Go

刺激が提示された場合は反応するが No-go 刺激が提示された場合は反応を抑制しなければならない。No-go 刺激に対してエラー反応を起こす場合があるが、No-go 刺激に対して抑制できた試行との差は反応の有無であるため先述した選択反応課題よりも容易な課題である。これらの課題ではエラーが誘発されやすく、多くのエラーモニタリングの研究で用いられている。

行動指標によるエラーモニタリングの研究では、反応時間、エラー率及びエラー後の反応時間が主な指標となっている。例えば正反応に比べるとエラー反応において反応時間が短いことや、早急なエラー修正行動がおこる(error correction)。実験参加者は、選択反応課題でのエラー反応直後に、正反応に修正することが報告されている(Rabbitt, 1966)。さらにエラー反応の次試行において反応時間が遅延すること(ポストエラースローイング, post-error slowing: PES)が報告されている(e.g., Rabbitt, 1966)。PES は、エラー反応を繰り返し起こさないための方略的な行動調整である。このような結果からエラーモニタリング機能は、エラーが起こればそれを検出するエラー検出機能と、エラーが起こった場合早急にかつ自動的にエラーの修正を試みるエラー補償機能(remedial action)によって成り立つと推察された(Rabbitt, 1966)。しかしながら行動指標の結果は、エラーモニタリング機能が情報処理を終えた最終的な末梢の出力結果であり、脳内の情報処理を直接反映しているのか不明である。直接的にエラーモニタリング機能を検討するためには、脳活動を記録する必要がある。

## 第2章 事象関連電位によるエラーモニタリングの研究

行動指標から推定されたエラー処理過程と脳内活動との関係を検討するには、脳の活動部位よりも、脳の活動変化を時系列に沿って捉える手法の適用が望ましい。脳機能を検討する指標として、時間分解能に優れた ERP (脳波)が有効である。ERP は、ある事象に脳波を揃えて加算平均することで得られる一過性の脳電位変化であり、ミリ秒単位の脳内情報処理過程を反映する。

### 第1節 ERN, Pe の形態的特徴, 頭皮上分布

Figure 1-1 は、頭皮上の前頭部と中心部におけるエラー反応同期波形を示している。選択反応課題中のエラー反応時点に脳波を揃えて加算平均するとエラー反応後 70 – 100 ms に鋭い陰性電位が前頭-中心に観察される。この陰性電位は Falkenstein のグループと Gehring のグループが同時期に報告され、エラー関連陰性電位(error-related negativity: ERN, Gehring et al., 1990; error negativity: Ne, Falkenstein et al., 1990)と命名された。ERN に続く揺るやかな陽性成分 Pe (error-positivity)は, Falkenstein et al. (1991) によって報告された。Pe は、エラー反応後 200 – 500 ms にかけて惹起し、中心-頭頂に頭皮上分布を示す。

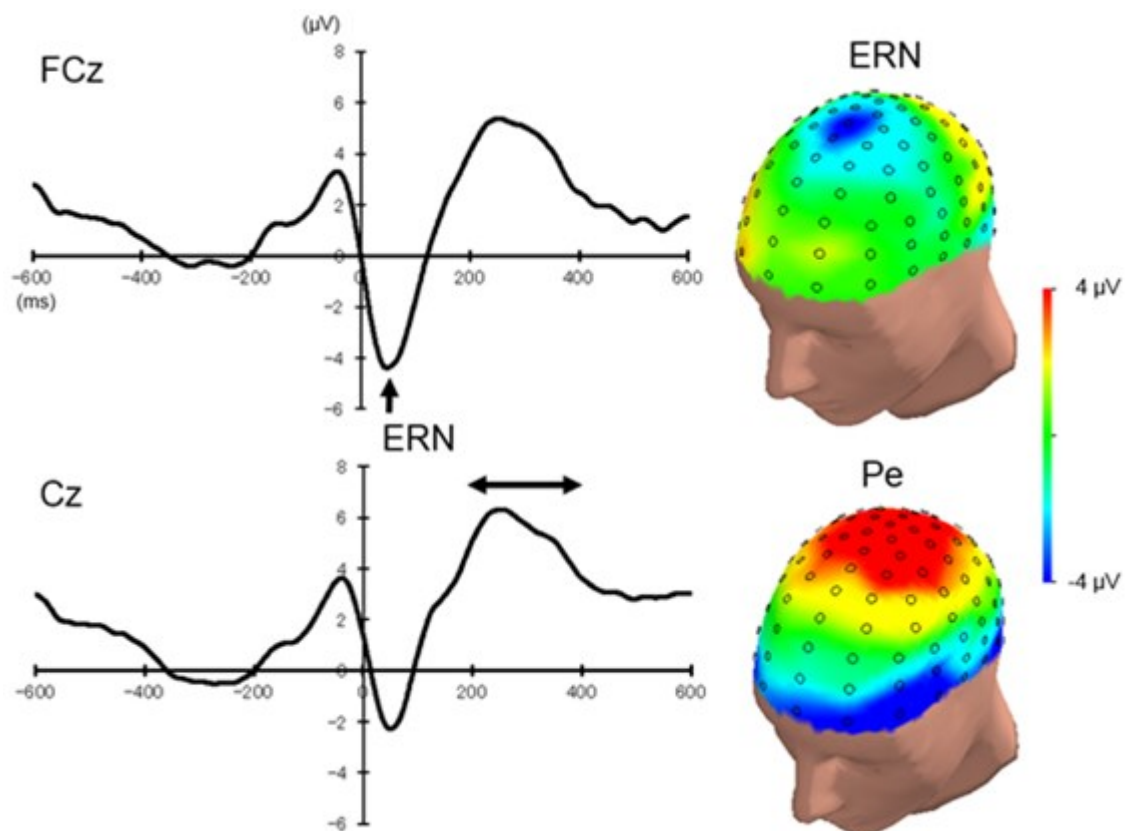


Figure 1-1. ERN と Pe の模式図とその頭皮上分布

## 第2節 ERN, Pe の発生源及び脳内機序

ERN の発生源は、主に前部帯状皮質(anterior cingulate cortex: ACC)及び補足運動野(supplementary motor area: SMA)に推定されている(Dehaene et al., 1994; Iannaccone et al., 2015; van Veen & Carter, 2002). Dehaene, Posner, and Tucker (1994)の場合、頭皮上(64 ch)の電位分布に brain electric source analysis (BESA, Scherg, & Berg, 1990)を適用し、ERN の発生源を ACC 及び SMA に推定した. van Veen and Carter (2002)は ERP に対する BESA 適用と機能的MRI (functional magnetic resonance imaging: fMRI)撮像の両者から ERN の発生源を ACC に推定した. fMRI 撮像による多く研究から、正反応

と比べエラー反応で ACC の活動増大が報告されている(Iannaccone et al., 2015; Ullsperger et al., 2004; Ridderinkhof, Van Den Wildenberg, Segalowitz, & Carter, 2004; Shenhav, Botvinick, & Cohen, 2013).

Pe は ACC 及び後部帯状回(posterior cingulate cortex: PCC)にその発生源が推定されている(O'Connell et al., 2007; 2009; van Boxtel, van der Molen, & Jennings, 2005). van Boxtel et al. (2005)は, Go/No-go 課題で脳波を計測し, BESA 適用によって Pe の発生源を ACC に推定した. O'Connell et al. (2007; 2009)は, ACC に加えて PCC にも Pe の発生源を推定している. PCC はエラー反応後の処理及びエラーへの気づき (consciousness)に関わっていることが報告されている(Badgaiyan & Posner, 1998; Cavanna & Trimble, 2006; Menon, Adleman, White, Glover, & Reiss, 2001).

エラーへの気づきという点から, Pe の生起には前部島皮質(anterior insula cortex: AIC)も関与している(Klein et al., 2007; Ullsperger, Danielmeier, & Jocham, 2014; Ullsperger, Harsay, Wessel, & Ridderinkhof, 2010). 自覚のあるエラー試行と自覚のないエラー試行を比較すると, 自覚のある試行で Pe は大きい(Nieuwenhuis et al., 2001). Nieuwenhuis et al. (2001)と同一課題を用いた fMRI 研究では, 自覚のあるエラー試行で AIC の大きな賦活が報告されている(Klein et al., 2007). これらの知見から Pe の惹起には ACC, PCC 及び AIC といった部位が関与し, エラー検出後の情報処理を担っていると考えられる.

### 第3節 ERN の機能的意義

ERN は発見当初から、実際の反応に関する表象と目標とする反応に関する表象との不一致(エラー)の検出を反映すると考えられてきた(Falkenstein et al., 1990; Gehring et al., 1993). Falkenstein et al. (1990)は、刺激に対してできるだけ速く正確に反応するフランカー課題を用い検討を行った。エラー試行の脳波を反応時点に揃えて加算平均するとエラー反応後に ERN が観察されたが正反応では鋭敏な陰性成分は観察されなかった。ERN は正反応に比較してエラー反応時に増大することから、エラー特有の電位であるものと結論づけられた。Gehring et al. (1993)はフランカー課題を用いて、反応の速度と正確さ(speed-accuracy trade-off)を操作した3条件で ERN を比較した。速度強調条件では実験参加者は反応時間を短くすることを重視するよう求められた。精度強調条件では反応の正確さを重視するよう求められた。速度精度強調条件では、早くかつ正確に反応することを求められた。実験の結果、速度強調条件よりも精度強調条件のほうで ERN は増大した。精度強調条件では、エラー抑制を優先してエラー検出処理が高まったものと解釈された。

Holroyd and Coles (2002)は、目標反応と実際の反応を比較する比較器に大脳基底核(basal ganglia)を仮定し強化学習理論(reinforcement-learning theory: RL)を提唱した。強化学習理論によれば、大脳基底核は環境(外的)や自身による行動(内的)からの情報をモニタリングし、これまでの経験をもとに現在起こっている出来事を評価するという。大脳基底核によってモニタリングされた結果が、期待よりも良かった場合は中脳ドーパミン系の活動が増大し、期待よりも悪かった場合は活動が減少する。エ

ラー反応は後者の場合であり，中脳ドーパミンの一過性の減少によってエラー信号が ACC に送られる．これによって ACC が脱抑制を起こし，ERN が惹起すると説明される．

一方，ERN はエラー検出ではなく反応コンフリクト(response conflict)を反映すると主張する研究がある．反応コンフリクトは，選択反応課題において正反応肢の賦活とエラー反応肢の賦活が脳内で競合することを指す．Carter et al. (1998)は fMRI を用いて，選択反応課題遂行中のエラー反応時に ACC の強い活動を観察したことに加え，正反応時にも ACC の活動を観察した．もし ACC が正反応ではなくエラー反応を排他的に検出するのであれば，正反応時に ACC は活動しないはずである．したがって，ACC の役割はエラー検出に限定されず，課題遂行上で生じる反応コンフリクトの検出にあると解釈された．これは ERN の機能的意義を説明する反応コンフリクト仮説(response conflict account)として認知されるようになった．この仮説は Yeung, Botvinick, and Cohen (2004)の実験データとシミュレーションモデルとの比較からも支持されている．ACC は反応選択中の反応コンフリクトをモニタする領域であり，エラーは反応コンフリクトに含まれる概念として捉えるほうが合理的ということになる．

#### 第 4 節 Pe の機能的意義

ERN に後続して出現する陽性成分 Pe は，エラーの主観的評価(Falkenstein et al., 1991; 2000; Leuthold & Sommer, 1999)，エラーの気づき(awareness, Nieuwenhuis et al.,

2001; Shalgi, Barkan, & Deouell, 2009; Steinhauser & Yeung, 2012), 注意と関連すると考えられている(Overbeek, Nieuwenhuis, & Ridderinkhof, 2005). Pe は, Falkenstein et al. (1991)によって報告された. 彼らの実験では, 選択反応課題が用いられ, 提示された“F” か “J” の文字に対して出来るだけ速く正確に反応するというものであった. エラー試行の脳波を反応時点に揃えて加算平均すると, エラー反応後 200 – 500 ms に緩やかな陽性電位 Pe が観察された. 発見当初 Pe は, エラー反応によって惹起した P300 であると考えられた. P300 は, 脳波を刺激提示時点に揃えて加算平均して得られる ERP であり, 低頻度刺激へ向けられる注意や刺激評価を反映して増大する (Donchin & Coles, 1988). そのため, Pe は刺激に対する評価とエラー反応に対する評価の 2 つの情報処理を反映する可能性が示唆された. Leuthold and Sommer (1999)は, 刺激評価とエラー反応の評価が重畳しているのか, 選択反応課題を用いて検討した. 実験の結果, Pe は P300 と同じ頭皮上分布を示す一方で, 刺激提示時点よりも反応時点に同期させて算出したほうが鮮明になることから, エラー反応に関連した電位であると結論づけられた. このように, Pe は P300 に類似した ERP であり, エラー反応の主観的評価を反映する電位と考えられる.

その後の研究でも Pe はエラーの評価を反映する電位であることが支持されている (Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein, 2000; Nieuwenhuis et al., 2001; Ridderinkhof, Ramautar, & Wijnen, 2009). 例えば, エラー率の個人差に注目した研究では, エラー率の高い参加者よりもエラー率の低い参加者のほうが Pe は大きかった (Falkenstein et al., 2000). エラー率の低い実験参加者は, エラーの反復を避けるため



にエラーを詳細に評価した可能性があり、エラーの主観的評価の高まりが  $Pe$  増大の原因であると解釈されている。

Nieuwenhuis et al. (2001)は、アンチサッカード課題を用いて、エラーの自覚の有無が  $Pe$  の生起と関係していることを示した。サッカードは、視線をある対象物から別の対象物に視線を移すための急速な眼球運動である。実験では、コンピュータ画面に注視点が提示され、その後注視点の左右に命令刺激が提示される。命令刺激の前には 50%の確率で、命令刺激とは対称方向に手がかり刺激が提示される。実験参加者は命令に対してできるだけ早く命令刺激に視線を移動するように求められたが、突然提示される刺激前の手がかり刺激に対して無意識にエラーサッカードを起こしてしまう。Nieuwenhuis et al. (2001)は、エラーサッカードについて、気づきのあるエラー試行と気づきのないエラー試行に分類し、 $Pe$  を比較した。その結果、気づきのあるエラー試行では  $Pe$  が観察されたが、気づきのないエラー試行では  $Pe$  は惹起しなかった。O'Connell et al. (2007)は Go/No-go 課題で追試を試みている。実験参加者は、エラーに気づいた場合にはボタンを押すことを求められた。ここでも、気づきのあるエラー試行のほうが気づきのないエラー試行より  $Pe$  振幅値は大きかった。さらに輝度弁別課題でも、気づきのあるエラー試行時にのみ  $Pe$  が報告されている (Steinhauser & Yeung, 2012)。これら知見は  $Pe$  がエラーの認識や気づきを反映する電位成分であり、エラーの自覚が  $Pe$  生起の必要条件と考えることができそうである。

一方で、 $Pe$  は注意を反映することも報告されている (Moser, Hajcak, & Simons, 2005; Tanaka, 2009)。Moser et al. (2005)は、蜘蛛恐怖症の参加者の横に毒蜘蛛を提示した状

態で課題を遂行させる恐怖喚起条件と、毒蜘蛛を提示しない統制条件で  $Pe$  振幅値を比較した。実験の結果、ERN 振幅値は条件間で差がなかったものの、 $Pe$  は統制条件よりも恐怖喚起条件で減衰した。 $Pe$  減衰は、主課題の遂行よりも毒蜘蛛に注意資源が配分されたことに起因したものと解釈された。さらに課題切り替えによる注意制御を検討した実験では、注意制御負荷の低い条件よりも負荷の高い条件で  $Pe$  の低振幅化が生じた(Tanaka, 2009)。これらの報告は、 $Pe$  がエラー処理に配分された注意を反映することを示唆している。

このように  $Pe$  の機能的意義については複数の仮説が提唱されてきた。しかしながら実験変数を操作して因果関係を明確にすることで  $Pe$  の機能的意義を検証した研究は ERN に比べると少ない。

### 第3章 正反応におけるエラーモニタリング

選択反応課題中の正反応に対しても、ACC 活動や陰性成分の惹起が報告されている(Carter et al., 1998; Coles, Scheffers, & Holroyd, 2001)。これらの知見から、反応コンフリクト仮説が支持されるようになった。しかしながら、正反応として分類されている試行には、筋電位レベルの誤反応が含まれている可能性もある。例えば Go/No-go 課題では No-go 刺激に対して反応を抑制できたとしても、筋電位レベルでは筋活動が観察されることがある。この反応は純粋な正反応と区別して、部分エラー(partial error)と呼ぶことができる。もしエラーモニタリング機構が筋電位レベルの部分エラーも検出するのであれば、正反応時の陰性成分は ERN を反映しているだけかもしれ

ない。正反応における部分エラーは反応肢の筋電図をモニタすることで捉えることができることから(Nieuwenhuis et al., 2001; Vidal, Burle, Bonnet, Grapperon, & Hasbroucq, 2003; Vidal, Hasbroucq, Grapperon, & Bonnet, 2000), 正反応に対する陰性成分は詳細に検証していく必要がある。

## 第1節 部分エラーとエラーモニタリング

Vidal et al. (2000) は部分エラーに着目し、Go/No-go 課題を用いてエラーモニタリングを検討した。彼らは、EMGの有無によって No-go 試行を、(1)反応抑制できた正試行、(2)抑制できずに反応が生じたエラー試行、(3)ボタン押し反応には至らなかったものの、反応肢に筋活動が観察された部分エラー試行、の3条件に分類した。その結果、部分エラー試行でも EMG 反応後約 100 – 150 ms に低振幅ながら ERN が観察された。一方、部分エラー試行では Pe は惹起しなかった(Vidal et al., 2001, 2003)。Rochet, Spieser, Casini, Hasbroucq, and Burle (2014)によると、実験参加者は部分エラー試行の 82.3%をエラーとして自覚しないという。これらの知見は、Pe 生起の必要条件はエラーに対する主観的気づきであることを示している。Vidal et al. (2000)は、ERN よりもむしろ Peこそがエラー検出を反映する電位であると主張している。

## 第2節 サッカードエラーとエラーモニタリング

Nieuwenhuis et al. (2001)は、正反応でのエラーモニタリングについて、アンチサッカー課題を用い眼電位を記録して検討を行なっている。サッカード試行は、行動

上正試行であるが、眼電図の上ではエラー試行に分類される。彼らは自覚のあるエラー試行と自覚のないサッカードエラー試行で ERN と Pe を比較した。実験の結果、実験参加者が無意識にエラーを起こしている場合でも ERN は惹起し、自覚の有無では ERN 振幅値は変わらなかった。一方自覚したエラーに比べて自覚出来なかったエラー試行で Pe は低下した。これらの結果から Nieuwenhuis et al. (2001)は、ERN が無意識的なエラー検出過程を反映し、Pe が意識的なエラー評価過程を反映することを示唆した。

上述したように、部分エラーやサッカードエラーによって正反応におけるエラーモニタリングを検討することができる。ERN が反応コンフリクトを反映するとした先行研究では、正反応に部分エラーが混入する可能性を検討していないため、正反応での陰性成分は部分エラーによるエラー検出過程を反映しただけかもしれない。

#### 第4章 情動・動機づけ処理とエラーモニタリング

エラー反応は、実験参加者にとって意に反した悪い結果である。このためエラー反応は顕な感覚(salience) や負の情動を伴って知覚され、修正が迅速に行なわれる。また ERN と Pe の発生源と考えられている ACC は、情動処理にも関わっている(Bush, Luu, & Posner, 2000)。そのため近年では、エラーモニタリングと情動処理との関係性が検討されている。本章では、エラーモニタリングと情動処理との関係について従来の研究を概観する。

## 第1節 ERN と情動・動機づけ処理

Luu, Collins, and Tucker (2000)は、負の情動とエラーモニタリングとの関係性を検討した。彼らの実験では、PANAS (positive affect negative affects scale: Watson, Clark, & Tellegen, 1988)を用い、実験参加者の正の情動(positive affect: PA)や負の情動(negative affect: NA)について評価した。NA 得点と ERN の振幅値との間に相関関係があり、NA 得点が高い者ほど ERN の振幅値は大きかった。この結果から、負の情動を感じやすい者ほどエラー検出も高いことが明らかになった。Hajcak, Moser, Yeung, and Simons (2005)は、フランカー課題で正試行に 5 ポイントを随伴させた試行と 100 ポイントを随伴させた試行で ERN を比較した。その結果、5 ポイント試行よりも 100 ポイント試行のほうが ERN は大きかった。ERN の増大は、エラーの重大性が高まったことに起因している。その後の研究でも、エラーが個人にとってより重要で意味ある場合ほど ERN は増大している(Potts, 2011, Stürmer, Nigbur, Schacht, & Sommer, 2011)。Potts (2011)は、ERN が金銭罰と金銭報酬のどちらをより反映するかについて検討した。フランカー課題でエラー反応に金銭罰を随伴させた場合と正反応に金銭報酬を随伴させた場合で ERN を比較した結果、ERN は報酬条件よりも罰条件のほうが大きかった。ERN は報酬条件でも罰条件でも増大したが、報酬獲得よりも罰からの回避動機を強く反映することが示唆された。

一方、動機づけ要因が 3 水準以上の実験計画では ERN における動機づけの主効果が現れ難くなることが示唆されている(Chiu & Deldin, 2007)。この研究では、金銭罰条件、金銭報酬条件、統制条件の 3 条件で情動・動機づけが ERN に及ぼす影響を健

常者とうつ病患者を対象にして検討した。報酬条件では正反応毎に 5 セント獲得でき、罰条件ではエラー反応毎に 5 セント損失した。統制条件では、金銭の獲得も損失もなかった。この 3 条件で ERN を比較した結果、条件間で差はなかった。また Groom et al. (2013)も金銭罰条件、金銭報酬条件、統制条件の 3 条件間で ERN に差は生じないことを報告している。これらの知見から、報酬及び罰による動機づけの効果は 3 水準以上の計画では統計的検出力が低下するのかもしれない。

金銭罰・報酬ではなく、エラー反応に不快音を随伴させた聴覚性罰の効果を検討した研究もある(Elkins-Brown, Saunders, & Inzlicht, 2016; 正木・Gehring・高澤・山崎, 2004; Ogawa, Masaki, Yamazaki, & Sommer, 2011; Riesel, Weinberg, Endrass, Kathmann, & Hajcak, 2012)。例えば Riesel et al. (2012)は、フランカー課題を用いて不快音が ERN に及ぼす影響を検討した。エラー試行に 3500 Hz (100 dB)の不快音を随伴させた罰条件と、罰のない統制条件で ERN を比較した結果、統制条件よりも罰条件のほうが ERN は大きかった。この結果は、不快音の随伴によってエラーの重要性が高まったことに起因したものと結論づけられた。さらに Elkins-Brown et al. (2016)も、不快音 (3500 Hz, 95 dB)が ERN に及ぼす影響を検討している。実験の結果、2 条件間に ERN の差はなく、聴覚性罰は ERN に影響を及ぼさないことを報告した。Ogawa et al. (2011)は、空間ストループ課題を用いて、エラー反応に対して激励する条件、叱咤する条件、統制条件を設定し ERN を比較した。その結果、激励条件と統制条件に比べて叱咤条件では ERN が低下した。このように、聴覚性罰がエラー検出に及ぼす効果については知見は一致していない。

## 第2節 Pe と情動・動機づけ処理

Pe と情動・動機づけ処理の関係性を検討した研究は少ない。例えば Endrass et al. (2010)は、エラー反応に何も随伴させない統制条件よりも金銭罰を随伴させた罰条件のほうが Pe 振幅値は大きくなることを報告している。この結果は、金銭罰随伴によるエラー評価の高まりに起因したものと解釈された。さらに Potts (2011)も金銭報酬条件に比べて金銭罰条件で Pe の増大傾向を報告している。一方、聴覚性罰をエラー反応に随伴した研究(Elkins-Brown et al., 2016; Riesel et al., 2012)は、統制条件と罰条件で Pe に差がないことを報告している。しかし Ogawa et al. (2011)の研究では、統制条件よりも叱咤条件で Pe 振幅値が増大している。このようにエラー評価過程は、罰に対する回避動機の高まりに伴って強まる可能性が示唆されている。

## 第5章 エラーモニタリングと個人差

エラーモニタリングの情動处理的側面は、性格特性との関連性からも検討されている(e.g., Moser, Moran, Schroder, Donnellan, & Yeung, 2013)。近年は、罰及び報酬に対する反応性との関連が報告されている(Amodio, Master, Yee, & Taylor, 2008; Boksem, Tops, Kostermans, & De Cremer, 2008; Boksem, Tops, Wester, Meijman, & Lorist, 2006)。さらに Weinberg, Luhmann, Bress, and Hajcak (2012)は、エラーモニタリングと情動・動機づけ処理との関係性は性格特性によって異なる可能性を示唆している。本章では、エラーモニタリングと性格特性、加えて情動・動機づけ処理と性格特性の相互作用を検討した研究を概観する。

## 第1節 罰及び報酬に対する反応性の個人差

Gray (1970)は、動物実験及び損傷患者の実験で得られた神経機序に関する知見を基に行動抑制系(behavioral inhibition system: BIS)と行動賦活系(behavioral activation system: BAS)の2つの動機づけシステムを考案した。BISは罰及び及び無報酬に関する信号と、新規性の条件刺激を受けて活性化する動機づけシステムである。BISが活性化することによって罰刺激を受動的に回避したり、負の情動が喚起されたりする(Carver & White, 1994)。一方、BASは報酬の信号及び無罰の信号を受けて活性化される動機づけシステムである。BASが活性化することにより、報酬刺激を追及したり正の情動が喚起されたりする(Carver & White, 1994)。これらの2つの動機づけシステムを定量的に捉える質問紙として BIS/BAS 尺度(behavioral inhibition system/behavioral activation system scale)が開発されている(Carver & White, 1994)。BISは1因子、BASは3因子から構成される。さらにBASは、報酬の追求強度を表すBAS-D (BAS drive)、新奇な報酬への接近願望・意欲を示すBAS-F (BAS fun seeking)、報酬・報酬予期に対する反応を示すBAS-R (BAS reward responsiveness)の3つの下位尺度から構成されている。

## 第2節 ERN と性格特性

ERNは、不安や罰に対する反応性との関連性が報告されている。例えば Amodio et al. (2008)は、BIS/BAS 尺度(Carver & White, 1994)によって罰に対する反応性の高い者ほどERNが増大することを報告した。さらに負の情動を感じやすい者ほどERN振



振幅値が大きいこと(Hajcak, McDonald, & Simons, 2004)や特性不安の高い者ほど ERN 振幅値が大きいことが報告されている(Olvet & Hajcak, 2009a). さらにその後も不安や負の情動, 罰に対する反応性との関連性が多く報告されている(Aarts & Pourtois, 2010; Cavanagh & Shackman, 2014; Moser et al., 2013). これらの知見は, 負の情動に関連する性格特性が高い個人ほどエラーを検出しやすいことを示唆している.

一方 ERN を低下させる個人差として衝動性, 新奇性の追求性, 報酬に対する反応性が報告されている. 例えば, Santesso and Segalowitz (2009)は, 罰及び報酬への反応性を SPSRQ (sensitivity to punishment and sensitivity to reward questionnaire; Torrubia, Avila, Moltó, & Caseras, 2001)で評価した. SPSRQ は, BIS/BAS 尺度と同様, 罰及び報酬への反応性を測定する質問紙である. 彼らは報酬への反応性が高いほど ERN 振幅値が低下することを報告した. また Potts, George, Martin, and Barratt (2006)は, 衝動性を barratt impulsiveness scale (Patton & Stanford, 1995)によって評価し, ERN との関連性を検討した. 実験の結果, 衝動性の高い群は低い群に比べて ERN が小さかった. このような結果は, 報酬への反応性や衝動性の高い者ほど正の感情を生起させやすく, エラーを気にすることなく次試行に反応準備を迅速に行う可能性を示唆している(Balconi & Crivelli, 2010).

### 第3節 情動・動機づけと性格特性が ERN に及ぼす影響

Dikman and Allen (2000) は社会的習熟度と金銭報酬が ERN にどのように影響を及ぼすのか検討した. 実験参加者から社会性の高い上位 15 名(高社会性群)と社会性の

低い下位 15 名(低社会性群)抽出し、聴覚性罰条件と金銭報酬条件とで ERN の比較を行なった。実験の結果、低社会性群の罰条件の ERN は、高社会性群の報酬条件の ERN よりも小さく、高社会性群では罰条件と報酬条件の ERN の差はなかった。これらの知見から、高社会性群では報酬の有無に関わらずエラー検出過程が働いている一方、低社会性群では報酬がない条件でエラー検出が低下することが示された。また Pailing and Segalowitz (2004) は性格特性質問紙 NEO-PI-R (NEO personality inventory revised, Costa & McCrae, 1992)を用いて性格特性と動機づけが ERN に及ぼす影響を検討している。実験の結果、性格特性によってモチベーションの効果(金銭条件の ERN 振幅値と統制条件の ERN の差分値)が異なることを示した。例えば、神経症傾向の低い者ほどで統制条件よりも報酬条件で ERN が大きくなることを報告している。また誠実性が高い者は報酬の有無に関わらず課題を遂行し ERN に条件間で差が認められないが、誠実性が低い実験参加者では、報酬がない場合 ERN の低下が観察された。さらに Boksem et al. (2008)も罰及び報酬に対する反応性の個人差と ERN との関連性を検討している。実験の結果、罰に対する反応性によって ERN における金銭罰報酬の効果が異なることを示した。罰群では BIS が高い者ほど ERN 振幅値が大きい相関関係があったが、報酬群では、BIS と ERN との間に相関関係はなかった。また罰群では、報酬に動機づけられている者ほど ERN が小さくなる傾向にあった。この結果から、罰に対して敏感な者ほど罰が随伴する状況ではエラー検出が高いことが示された。また、罰が随伴する状況では報酬に動機づけられている者ほどエラー検出が低いことが示唆された。これらの知見は、情動・動機づけが ERN に及ぼす

影響は性格特性によって異なることを示唆している。

#### 第4節 Pe と性格特性

Hajcak et al. (2004)は、PANAS を用い、情動とエラーモニタリングの関連性を検討している。Pe は、負の情動が低い者よりも高い者で低下することが報告された。負の情動が高い者は、エラーに対する認識が低い可能性があると解釈された。また報酬への反応性が高い者ほど Pe 振幅値が低下することが報告されている(Boksem et al., 2008)。Boksem et al. (2008)は BAS の下位尺度である BAS-R の高いほど Pe が低下することを報告した。BAS-R の得点は、報酬への反応性を表し、ポジティブな情動を抱きやすい者ほどエラーを評価することなく報酬を追求すると解釈された。このような結果は、性格特性としての情動の高さがエラーの評価を低下させる可能性を示唆している。さらに Moser, Schroder, Heeter, Moran, and Lee (2011)は、学習や知能に対する構え(mind-set)が Pe と関連していることを報告した。学習に対する構えは、知能が変化しないものと考え失敗を自らの能力の無さとして見なす心的傾向(fixed mind-set)と知能が学習によって発達すると考えエラーを有益な情報として見なす心的傾向(growth mind-set)に分類された。Pe と質問紙による mind-set 得点との関係性を検証した。実験の結果、mind-set の得点が高い者ほどの Pe が増大する相関関係が得られた。完璧主義者ほど Pe 振幅値は増大すること(Tops, Koole, & Wijers, 2013)も報告されており、エラーを有益な情報と見なす者ほどエラー反応をより評価すると解釈された。

## 第6章 本研究の目的

以上のように脳内のエラーモニタリングは、ERN、Pe によって明らかにされつつある。共通する知見として ERN はエラーの検出を、Pe はエラーの評価を反映する。さらに ERN は、正反応における微細なエラー反応によっても惹起する。近年ではエラーモニタリングと情動処理との関係性が報告されており、エラー反応に対する情動・動機づけによって ERN が増大することが報告されているが、知見に不一致な点がある。これまでエラーモニタリングと情動・動機づけ処理との関係性を検討した多くの研究は、ERN に主眼を置き、Pe や正反応でのエラーモニタリングが情動・動機づけ処理を反映するかどうかは明らかではない。

そこで本研究では、ERN に加えて Pe や部分エラーERN を生理指標とし、罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。先行研究では、エラー検出に対する罰及び報酬の影響は検討されているものの、エラーモニタリングという包括的な機能に罰及び報酬が影響を与えるのか検討されていない。本研究では①聴覚性罰がエラーモニタリングに及ぼす影響、②金銭罰の量的差異がエラーモニタリングに及ぼす影響、③金銭罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響、を明らかにするために3つの実験を行った。

実験1ではエラーモニタリングに及ぼす聴覚性罰の効果を空間ストループ課題によって検討した。先述した通り、聴覚性罰を用いた研究では知見の一致がみられていない。また従来のエラーモニタリングと情動処理との関係性を検討した研究では、罰も報酬も随伴させない統制条件を設定した研究が少ない。実験1では、統制条件

と罰条件で ERN 及び Pe を比較した．実験 2 では，エラーモニタリングに及ぼす金銭罰の効果を Go/No-go 課題を用いて検討した．大きさの異なる罰がエラーモニタリングに及ぼす影響を検討した研究はこれまでにない．そこで ERN 及び Pe を高罰条件，低罰条件，統制条件の 3 条件間で比較した．実験 3 ではエラーモニタリングに及ぼす金銭罰及び報酬の効果を検討した．ここでも ERN 及び Pe を報酬条件，罰条件，統制条件の 3 条件間で比較した．従来のエラーモニタリング研究では，選択反応課題でのボタン押しによるエラー反応が主な研究対象であった．しかし，部分エラーでもエラーモニタリング機能は駆動することから，実験 2 と実験 3 では，部分エラーも解析対象とした．

## 第 2 部 実験 1 聴覚性罰がエラーモニタリングに及ぼす影響

### 第 1 章 目的

実験 1 では、エラー反応への不快音の随伴がエラーモニタリングに及ぼす影響を検討した。聴覚性罰をエラー反応に随伴させた罰条件と統制条件と比較することで ERN と Pe が変化するかどうか検討した。不快音の随伴がエラー検出を高めるのであれば、ERN 振幅は罰条件で増大することが予測される。また罰刺激を伴うエラー反応を主観的に評価する過程が Pe に反映されるのであれば、Pe 振幅も罰条件で増大すると予測できる。さらにエラーモニタリングが罰及び報酬への反応性の個人差によって異なるかについて検討した。金銭罰の操作によって得られた従来の知見が、不快音随伴時にも敷衍する現象ならば、BIS と ERN 振幅値との負の相関関係及び BAS (特に BAS-D) と Pe 振幅値との負の相関関係が得られることが予測される。BIS の高得点者は、罰に対して鋭敏に反応するため、エラー検出が強まり ERN 振幅値は大きいと予測される。またエラー反応に罰を随伴させることから、罰条件では Boksem et al. (2008) 同様、BAS の高い者ほど Pe は小さくなるものと予測される。

### 第 2 章 方法

実験参加者 心身ともに健常な男性大学生 19 名(平均年齢 20.8 歳, SEM: 0.20)を対象とした。本研究は早稲田大学倫理委員会より承認を受けた。

手続き 実験には空間ストループ課題(Masaki & Segalowitz, 2004)を用いた(Fig. 2-1)。

刺激はタキストスコープ(岩通アイセック社製 IS-702AV Tachistoscope)を用いて参加者前方 100 cm の位置に設置した CRT (cathode-ray tube, Mitsubishi RD21E III)上に提示した。注視点(視覚  $1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$ )提示の 300 ms 後に、注視点の上下いずれかの位置に、上下いずれかの方向を指す白色矢印(視覚  $1.1^{\circ} \times 0.6^{\circ}$ )を 200 ms 間ランダムに提示した。課題は、矢印刺激の提示位置を無視し、矢印の方向に対してキー上げで反応することであった。反応を測定するため、木製フラットボード上にマイクロスイッチを縦配列させ、左右第 3 指の伸展動作でスイッチが入るようにした。提示刺激は、矢印の方向と提示位置が同じ刺激を一致試行(congruent: 以下 C 試行)、矢印の方向と提示位置が異なる刺激を不一致試行(incongruent: 以下 IC 試行)とした。試行間間隔は 1000 ms とした。エラー反応が生じた際には、誤反応後 1000 ms に赤色で「Error！」の文字を 500 ms 間提示した。また、刺激提示後 500 ms 以内に反応できなかった場合には、刺激提示後 1000 ms に赤色で「Too Late！」の文字を 500 ms 間提示した。

実験では、エラー反応に不快音を罰刺激として随伴させる罰条件と、エラー反応に罰刺激を随伴させない統制条件の 2 条件を設定した。罰条件では、エラー反応及び無反応に対して 2 種類の不快音(いずれも黒板を爪で擦過した際の音を録音編集したもの)をランダムに随伴させた。不快音は「Error！」表示と同時に、参加者の背後 75 cm に設置したスピーカから提示した(音圧: 90 dB/SPL)。各条件とも 72 試行を 1 ブロックとし、連続 4 ブロック遂行した。ブロック終了毎に休憩を適宜設定した。条件の提示順序は参加者間でカウンタバランスをとった。実験終了後に別室で日本語版 BIS/BAS 尺度(高橋他, 2007)を用い BIS/BAS を計測した。

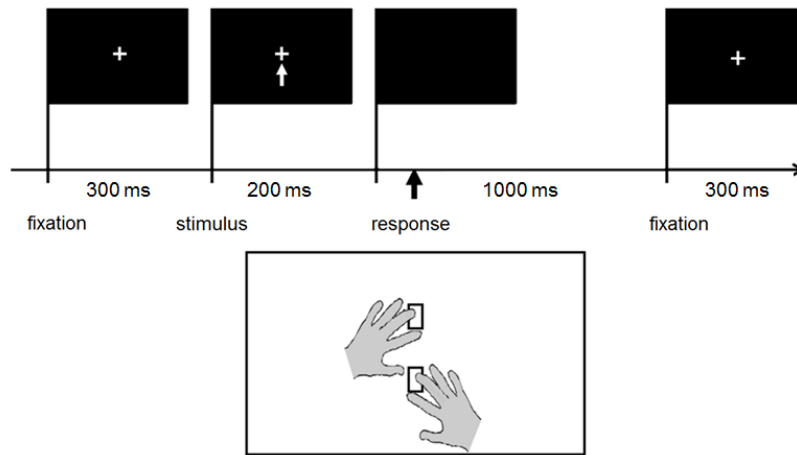


Figure 2-1. 空間ストロープ課題の手順

記録方法 脳波(electroencephalogram: EEG)及び眼電図(electrooculogram: EOG)をデジタル脳波計システム(Biosemi 社製 Active-Two)で同時記録した。いずれも電極はAg/AgCl アクティブ電極を用いた。脳波は頭皮上 128 部位(Biosemi 電極配置法に依拠)から導出した。眼球運動をモニタするため、水平 EOG を両眼角外 1 cm から記録し、垂直 EOG を左眼窩上下縁部から記録した。全ての生理指標は、記録時にはサンプリング周波数 1024 Hz で DC 導出し、オフラインで 0.1-30 Hz (roll-off 12 dB)のバンドパスフィルタを適用した。反応時間は、刺激提示時点からキー上げ時点までを ms 単位で計測した。

分析方法 EEG はキー上げ反応時点をトリガにして、その前 700 ms、後 700 ms の合計 1400 ms 区間を切り出した。EEG に重畳した瞬目は Gratton 法(Gratton, Coles, & Donchin, 1983)によって修正した。その後、 $\pm 100 \mu\text{V}$  以上の電位変動が生じた試行及び体動由来のアーチファクト混入試行を除外したうえで、キー上げ反応時点をトリ



ガに EEG を加算平均した。

頭皮上分布に基づき，ERN 振幅値は FCz 電極(Biosemi 電極 C23)で計測し，Pe 振幅値は FCz 及び Cz (Biosemi 電極 A1)で計測した．ERN 振幅値は，エラー反応時点を基準に−100 ms から+150 ms までの区間における最大陰性電位と，その直前の最大陽性電位との差分値を計測した(peak to peak 法)．Pe 振幅値は，エラー反応前 300−200 ms 区間の平均電位を基線とし，エラー反応後 150−350 ms の区間平均電位を計測した。

平均反応時間及び平均エラー率については，条件(罰/統制) × 刺激整合性(C/IC)の 2 要因分散分析に供した．また，制限時間(500 ms)以内に反応できなかった試行の比率を時間切れ率と定義し，エラー率同様に条件(罰/統制) × 刺激整合性(C/IC)の 2 要因分散分析を適用した．ERN の振幅値(FCz)は対応のある t 検定により条件間の比較を行った．Pe 振幅値は，条件(罰/統制) × 部位(FCz/Cz)の 2 要因分散分析に供した。

BIS/BAS 尺度は，全 20 項目の質問に対して「そう思う：4 点」，「しばしばそう思う：3 点」，「あまりそう思わない：2 点」，「全く思わない：1 点」の 4 件法で回答を求め，BIS，BAS のそれぞれについて合計点を算出した．さらに BAS を構成する BAS-D，BAS-F，BAS-R の各項目得点を算出した．これらの得点は，ERP 振幅値及び行動指標との相関分析に用い，ピアソンの積率相関係数を算出した。

罰刺激の不快音をどの程度不快に感じていたかを評価するため，罰条件の開始前と終了後に 2 種類の不快音を参加者に提示しながら，SAM (self-assessment manikin, Bradley & Lang, 1994) で“感情価”と“覚醒”を評定してもらった．SAM は 9 件法

を採用しており，最大値 9 点，最小値 1 点として得点化した．“感情価”項目は低得点ほど不快を示し，高得点ほど快を示した．“覚醒”は，低得点ほど低覚醒を示し，高点数ほど高覚醒を示した．

### 第 3 章 結果

不快音に対する SAM の平均情動得点は，罰条件開始前で 3.1 ( $SEM = .36$ )，罰条件終了後で 3.5 ( $SEM = .37$ )であり，いずれも不快方向にシフトしていた．罰条件の前後で不快感情得点に差はなかった( $t(18) = 1.48, n.s.$ )．一方，平均覚醒得点は罰条件前で 7.8 ( $SEM = .30$ )，罰条件終了後で 6.5 ( $SEM = .36$ )であり，罰条件終了後では低下していた( $t(18) = 4.65, p < .01$ )．

Figure 2-2 は，各条件の C 試行と IC 試行の平均反応時間，平均エラー率，を示している．反応時間について 2 要因分散分析を実施した結果，IC 試行のほうが C 試行よりも反応時間は有意に長かったが( $F(1, 18) = 344.16, p < .01, \eta^2_p = .95$ )，条件間に差はなかった( $F(1, 18) = .30, n.s.$ )．交互作用は有意傾向だった( $F(1, 18) = 3.80, p = .07, \eta^2_p = .17$ )．

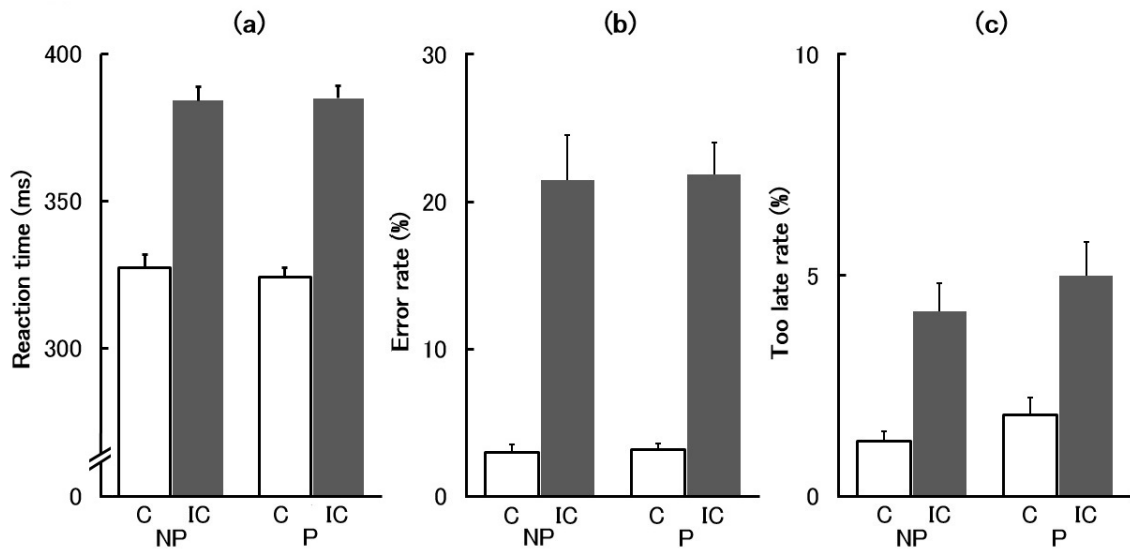


Figure 2-2. 一致試行と不一致試行における平均反応時間(a), エラー率(b), 遅延反応率(c)の条件間比較. エラーバーは, 標準誤差(standard error of the mean; SEM)を示す. C は一致試行, IC は不一致試行を示す. NP は統制条件, P は罰条件を示す.

エラー率について 2 要因分散分析を実施した結果, IC 試行のほうが C 試行よりも有意に高かったが( $F(1, 18) = 75.18, p < .01, \eta^2_p = .81$ ), 条件間に差はなかった( $F(1, 18) = .05, n. s.$ ). 交互作用もなかった( $F(1, 18) = .01, n. s.$ ).

Figure 2-3 は, エラー試行時の FCz における総加算平均波形を示している. ERN の平均振幅値は統制条件で  $-7.05 \mu V$  ( $SEM = .95$ ), 罰条件で  $-7.51 \mu V$  ( $SEM = .78$ )であった. ERN 振幅値を条件間で比較した結果, 差はなかった( $t(18) = .80, n. s.$ ).

Figure 2-4 は, エラー試行時の Cz における総加算平均波形を示している. Pe の平均振幅値は, 統制条件では FCz :  $4.8 \mu V$  ( $SEM = .45$ ), Cz :  $5.6 \mu V$  ( $SEM = .54$ )であり, 罰条件では FCz :  $6.1 \mu V$  ( $SEM = .61$ ), Cz :  $5.9 \mu V$  ( $SEM = .57$ )であった. Pe 振幅値に対して, 条件(罰/統制)  $\times$  部位(FCz/Cz)の 2 要因分散分析を実施した結果, 統制条件よりも罰条件のほうが大きかった( $F(1, 18) = 4.53, p < .05, \eta^2_p = .20$ ). 部位の主効果は

なかった( $F(1, 18) = 0.49, p = .50, \eta^2_p = .03$ ). 交互作用は有意傾向だった( $F(1, 18) = 3.68, p = .07, \eta^2_p = .17$ ).

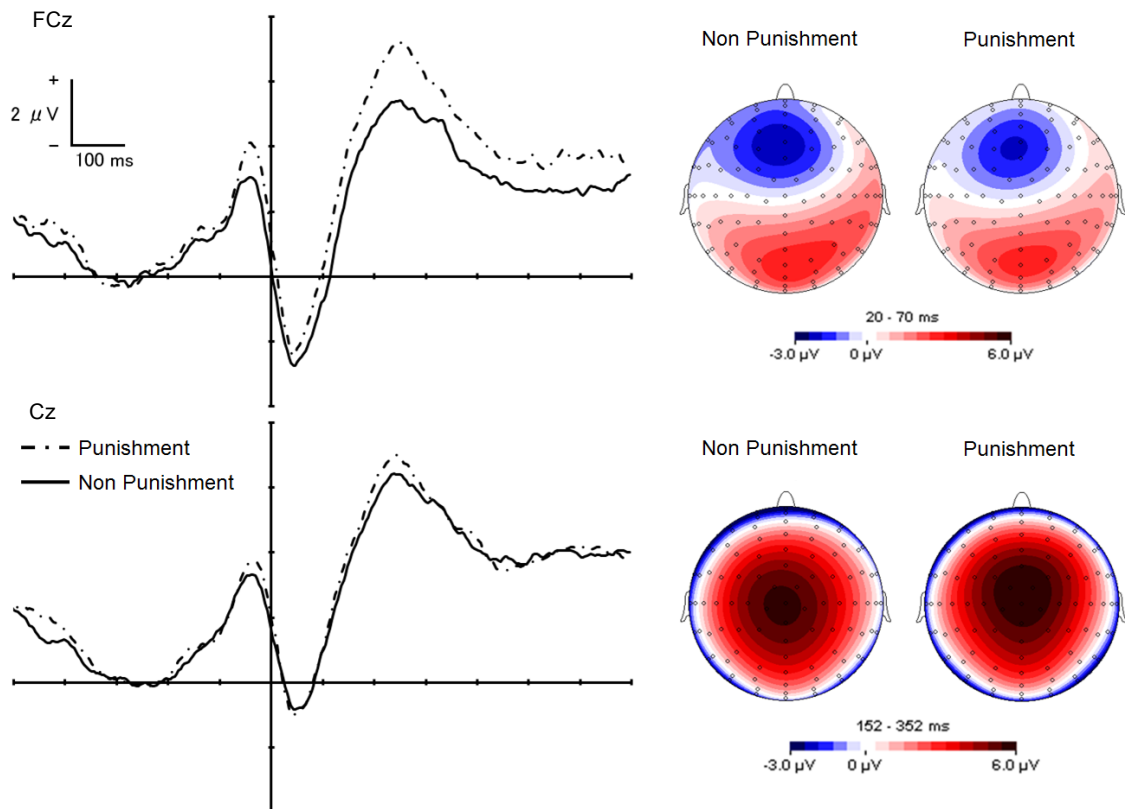


Figure 2-3. FCz, Cz における反応同期 ERP の条件間比較. 図中の NP は統制条件, P は罰条件を示す.

Table 2-1 は, ERN 振幅値(FCz)及び Pe 振幅値(FCz/Cz)と, BIS/BAS 尺度得点との相関係数を示している. ERN 振幅値と BIS/BAS 得点との相関関係は, 罰条件, 統制条件ともに認められなかった. Pe 振幅値と BIS 得点との相関関係も両条件ともに認められなかった.

Table 2-1. BIS/BAS と行動指標及び生理指標の相関係数

	BIS	BAS	BAS-D	BAS-F	BAS-R
RT (C/P)	- .18	- .01	- .23	.31	- .13
RT (IC/P)	.15	.01	- .22	.27	- .04
RT (C/NP)	- .33	- .26	- .47*	.15	- .32
RT (IC/NP)	- .11	- .10	- .25	.18	- .20
Error rate (C/P)	- .19	.11	.03	.03	.24
Error rate (IC/P)	.20	.22	- .03	.20	.40
Error rate (C/NP)	.01	.06	.01	- .11	.28
Error rate (IC/NP)	.23	.30	.21	.05	.52*
ERN (P)	.05	.13	- .04	.13	.27
ERN (NP)	.19	- .03	- .12	- .04	.11
Pe (P/FCz)	.15	- .41	- .32	- .43	- .25
Pe (NP/FCz)	.10	- .24	- .24	- .11	- .25
Pe (P/Cz)	- .13	- .65**	- .49*	- .53*	- .59**
Pe (NP/Cz)	- .06	- .50*	- .33	- .42	- .51*

C= Compatible trial, IC= Incompatible trial, P= Punishment, NP= Non-Punishment

\*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ 

しかしながら、Pe と BAS との関係では、BAS の高得点者ほど低振幅 Pe を示す中程度の負の相関関係が両条件で認められた(罰条件 :  $r = -0.65, p < .01$ , 統制条件 :  $r = -0.50, p < .05$ )(Fig. 2-4). さらに罰条件では、Pe 振幅値と BAS 下位項目の各得点との間に負の相関関係が認められた(BAS-D:  $r = -0.49, p < .05$ , BAS-F:  $r = -0.53, p < .05$ , BAS-R:  $r = -0.59, p < .01$ ). 一方、統制条件では、Pe 振幅値と BAS-R 得点との間のみ負の相関関係が認められ(BAS-R:  $r = -0.51, p < .05$ ), その他の下位項目には相関はなかった(BAS-F:  $r = -0.42, p = .07$ ; BAS-D:  $r = -0.33, n. s.$ ).

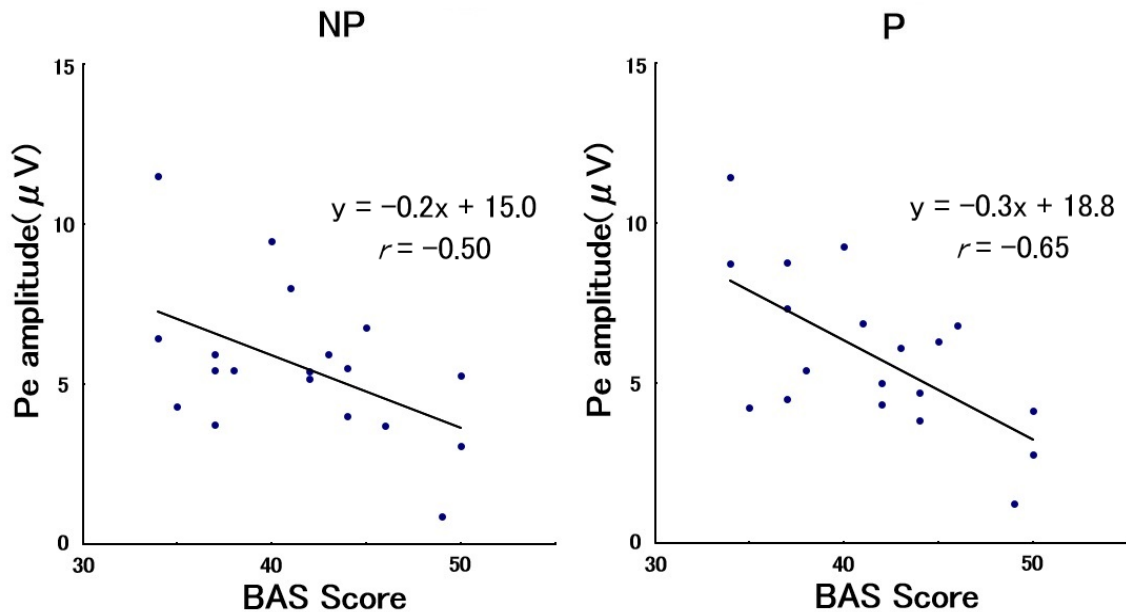


Figure 2-4. 罰条件と統制条件における Pe 振幅値と BAS 得点の相関図

このように、最大振幅値を示した Cz での Pe 振幅値には BAS との負の相関関係が認められた。しかしながら、FCz での Pe 振幅値には BAS との有意な相関関係はなかった(Table 1).

#### 第4章 考察

本実験では、不快音を罰としてエラー反応に随伴させた場合 ERN と Pe が変化するか検証した。その結果、罰随伴によって ERN 振幅は変化しなかったものの、Pe には振幅増大が認められた。さらに、罰及び報酬に対する反応性を BIS/BAS 尺度で評価し、ERN と Pe の振幅値との関連性を調べた。その結果、ERN と BIS との関連性は認められなかったものの、罰の有無に関わらず BAS の高得点者ほど Pe 振幅値

は小さかった。

本実験では、罰随伴によってエラー検出が強まり、ERN 振幅が増大するものと予測した。しかしながら、罰条件と統制条件との間で ERN 振幅に差はなく、不快音の随伴ではエラー検出過程は影響を受けないことが示唆された。この結果は、エラーに対する騒音随伴によって ERN が増大した知見(Riesel et al., 2012) とも、叱咤刺激の随伴によって ERN が減衰した知見(Ogawa et al., 2011) とも合致しない。

SAM による評価(Bradley & Lang, 1994) 結果から、実験参加者は罰刺激を不快に感じていたことが示唆された。そのため、本研究で用いた不快音でも回避動機が強まった可能性がある。一方、ERN 増大を報告した Riesel et al. (2012) は 100 dB の罰刺激を用いており、90 dB の罰刺激を用いた本実験よりも音圧は非常に大きかった。したがって、本実験では実験参加者は罰刺激を不快に感じていたものの ERN を増大させるほどの刺激強度及び回避動機の強さになっていなかった可能性がある。

Pe 振幅値については、罰条件のほうが統制条件よりも大きかった。Pe はエラーの主観的・意識的評価と関係することから(Endrass, Reuter, & Kathmann, 2007; Falkenstein, Hohnsbein, & Hoormann, 1995; Hewig, Coles, Trippe, Hecht, & Miltner, 2011; Leuthold & Sommer, 1999; Nieuwenhuis et al., 2001; O'Connell et al., 2007; Overbeek et al., 2005), 罰刺激の随伴によってエラー評価が促されたことを示唆している。不快な罰刺激からの回避は、エラーの評価を通して反応を修正することで達成される。本実験の結果は、エラーの反復を防止するうえで必要となる詳細なエラー評価を反映したものと考えられる。

このように不快音の罰効果は、ERN には認められなかったものの、Pe には振幅増大として現れた。両成分の乖離は、ERN よりも Pe のほうが罰の評価を鋭敏に反映することを示唆している。両成分間の乖離はこれまでも報告されており、主観的な評価過程がより関与する事態では、Pe のほうが ERN よりも大きく変化することが示されている (Asaoka et al, 2010; Murphy, Richard, Masaki, & Segalowitz, 2006; Nieuwenhuis et al., 2001)。本研究の結果が不快音に特異的なものであるかについては、Riesel et al. (2012) との知見が一致しないことと、回避動機の一過性変化を評価できていないことから、結論づけることは困難である。

さらに本実験では、行動賦活や抑制に対する個人差と ERP との関連を調べた。その結果、罰の有無に関わらず、Pe 振幅値と BAS 得点との間に中程度以上の負の相関関係を認めた。特に不快音を随伴させた条件では、Pe 振幅値とすべての BAS 下位因子との間に負の相関関係を認めた。Boksem et al. (2008) は、エラー反応に金銭罰を随伴させた場合、Pe 振幅値と BAS 下位尺度の BAS-D との間に負の相関関係を見出した。しかしながら、他の下位尺度との間には相関関係を認めていない。本研究では、Pe と BAS の様々な側面との関係性が認められ、Boksem et al. (2008) の知見をさらに強化する結果となった。

Pe と BAS との負の相関関係は不快音の罰随伴時に顕著のようにみえる。しかしながら、罰条件と統制条件の間で Pe 振幅値の差分値を再分析した結果、Pe 振幅値と BAS との間に相関関係はなかった。したがって、Pe 振幅値と BAS との負の相関関係は、罰随伴とは独立したものであり、BAS が反映する“報酬に対する追求性”、“報



酬への正の反応性”及び“報酬の探求欲求”といった特性と、Pe 振幅値との一般的関係性を示した結果と解釈するのが妥当であろう。

Balconi and Crivelli (2010)によると、BAS の高い者ほど正の感情を生起させやすく、課題遂行の効率性を重視するという。これは、報酬接近動機の強い者はエラーを悔み過ぎることはなく、次試行に備えた反応準備を迅速に行うことを示唆している。本研究の BAS 高得点者も、エラーの詳細な評価よりも次試行での効率的な課題遂行を重視する態勢を作った結果、Pe を減少させたのかもしれない。Pe 振幅値と行動指標との間に相関はなかったものの、統制条件では BAS 高得点者に反応の性急さがみられた(IC 試行のエラー率と BAS-R との正の相関及び C 試行の反応時間と BAS-D との負の相関)。

Pe とは異なり ERN 振幅については、罰の有無に関わらず BIS/BAS との関連性はみられなかった。従来の研究では、BIS の高得点者ほど高振幅 ERN を示している(Amodio et al., 2008; Boksem et al., 2006)。研究知見 75 編に対するメタ分析では(Moser et al., 2013)、高不安者のほうが ERN は高振幅を示すことが明らかにされている。BIS と不安との高い関連性(Carver & White, 1994)を考慮すると、本研究の結果は、不安を扱ったこれらの知見とも合致しなかったことになる。

Olvet and Hajcak (2009a)によると、不安と ERN との関係性はフィードバックの有無及び頻度によって調整されるという。一般にエラー反応は、明確な感覚(salience)をもって知覚され、そのためにエラー修正が迅速に行われる(e.g., Rabbitt, 1966)。それにも関わらず、当該試行がエラーだったと行為者にフィードバックすることは冗長

的な手続きである。しかし、フィードバック頻度を上げることは、高不安者に対してある種の安心感をもたらし、ERN 振幅を低下させることになるという(Olvet & Hajcak, 2009a)。エラー反応毎にフィードバックを提示した本研究の手続きが、BIS 高得点者の ERN を減少させた可能性を考慮すると、ERN と BIS との関連を得ることができなかったことも理解できる。

反応時間、エラー率、時間切れ率、PES のいずれも罰条件と統制条件との間で差はなかった。金銭罰を随伴させた従来の研究でも、罰がパフォーマンスに影響を及ぼした知見は少なく(Potts, 2011)、金銭罰には反応時間やエラー率を変化させるほどの効果はないことが示唆されている(Boksem et al., 2008; Hajcak et al., 2005; Stürmer et al., 2011)。本研究の結果は、エラーに対する不快音の随伴では、金銭罰と同様にパフォーマンスは影響を受けないことを示唆している。

本実験では不快音を罰として用いた結果、パフォーマンスや ERN への影響はないものの、Pe 振幅は増大することが示された。罰条件での Pe 増大は、罰からの回避動機に伴う詳細なエラー評価を反映したものと解釈された。また、BAS 得点と Pe 振幅値との間に、罰随伴とは独立した負の相関関係を認めた。これは、BAS に反映される報酬への接近動機が Pe の反応性を鈍化させることを示唆している。本研究の結果はいずれも、Pe がエラー評価を反映した成分であるという立場を支持している。

### 第 3 部 実験 2 金銭罰がエラーモニタリングに及ぼす影響

#### 第 1 章 目的

実験 1 では聴覚性罰を用い、罰の随伴によってエラー評価が高まることを明らかにした。しかしながら、罰の大きさを操作しエラーモニタリングを検討した研究は少ない。そこで実験 2 では、大きさの異なる罰の随伴がエラーモニタリングに及ぼす影響を検討した。Go/No-go 課題を用いて、エラー反応毎に 50 円の損失が生じる高罰条件、エラー反応毎に 5 円の損失が生じる低罰条件、統制条件の 3 条件を設定した。金銭罰の随伴がエラー検出を高めるのであれば(Endrass et al., 2010)、統制条件よりも低罰条件、高罰条件で ERN の増大することが予測される。一方、実験 1 と同様に罰の随伴がエラー検出に影響を及ぼさないのであれば、3 条件間で ERN 振幅値に差は生じないことになる。また、聴覚性罰と同様に金銭罰もエラー評価過程を強化させるのであれば、統制条件よりも低罰条件や高罰条件で  $Pe$  は増大するはずである。

実験 2 では正反応試行でのエラーモニタリングを検討するために部分エラーを分析した。部分エラー ERN が ERN と共通の神経機序を有するのであれば(Vidal et al., 2000; 2003), 部分エラー ERN に及ぼす金銭罰の効果は ERN と同様になるはずである。さらに、部分エラー ERN には反応抑制過程を反映する No-go N2 (Jodo & Kayama, 1992)が重畳し得るため(岩木, 1998; Masaki, Murphy, Desjardins, & Segalowitz, 2012), 刺激同期による加算平均を行ない、部分エラーの有無による波形の異同を検討する

こととした．ERP 波形の算出では，Go 試行の正反応，No-go 試行の正反応，No-go 試行の部分エラー反応，No-go 試行のエラー反応に分類した．部分エラーでも ERN が観察されることから(Vidal et al., 2000)，N2 は No-go 試行の正反応よりも No-go 試行の部分エラーのほうで増大すると予測される．

## 第 2 章 方法

**実験参加者** 心身ともに健常な男性大学生 26 名を対象とした．本研究は早稲田大学倫理委員会より承認を受けた．エラー数 5 試行以下の者を解析から除外し(Olvet & Hajcak, 2009b), 最終的な解析対象は 17 名であった(平均年齢は 21.7 歳,  $SEM = 0.28$ )

**手続き** 実験には Go/No-go 課題を用いた(Fig. 3-1). 刺激はタキストスコープ(岩通アイセック社製 IS-702AV Tachistoscope)を用いて参加者前方 100 cm の位置に設置した CRT (cathode-ray tube, Mitsubishi RD21E III)上に提示した．課題は，CRT 上画面の中央の位置に提示される M か V の文字に対して，M ならば反応し V ならば反応を抑制することであった．反応する文字は実験参加者間でカウンタバランスをとった．反応を測定するため，木製フラットボード上にマイクロスイッチを縦配列させ，右第 3 指の伸展動作でスイッチが入るようにした．提示刺激は，反応刺激を Go 試行，無反応刺激を No-go 試行とした．エラー反応が生じた際にフィードバックを提示しなかった．刺激提示後 450 ms 以内に反応できなかった場合には，刺激提示後 1000 ms に白色で「Too Late !」の文字を 500 ms 間提示した．

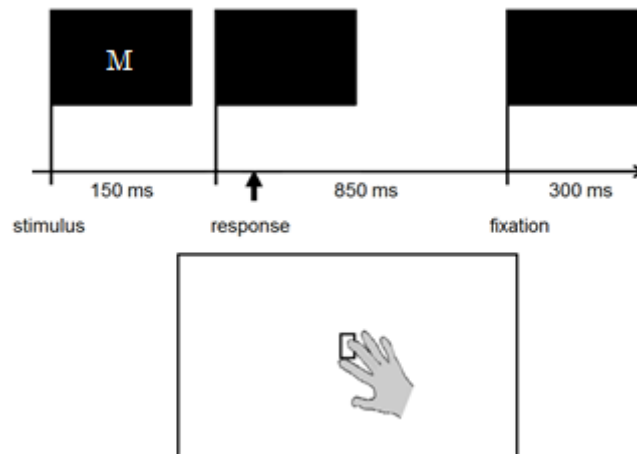


Figure 3-1. Go/No-go 課題の手順

実験では，エラー反応に金銭損失を随伴させる低罰条件と高罰条件，金銭の獲得も損失もない統制条件の3条件を設定した．低罰条件では，元金を1500円とし，エラー反応もしくはGo試行の無反応毎に5円の損失が生じた．高罰条件では，元金を1500円とし，エラー反応もしくはGo試行の無反応毎に50円の減額が生じた．統制条件では報酬の獲得も減額もなく課題を遂行するのみであった．各条件とも100試行(Go試行70試行，No-go試行30試行)を1ブロックとし，4ブロック遂行した．ブロック終了毎に休憩を適宜設定した．条件順序は実験参加者間でカウンタバランスをとるため6通りの条件順序があった(e.g. AABBBCCCCBBAA).

**記録方法** EEG及びEOGの記録方法は実験と同様であった．EMG測定用の電極は右腕橈骨筋2箇所(電極間距離は3cm)に装着し，EMGを記録した．(双極導出)．

**分析方法** EMGの立ち上がりを決定するために-700msから-500msの平均電位を基線とし，基線から4.0SDを超えたEMG活動をBrain Vision Analyzerによって自動同

定した。自動同定された EMG の立ち上がり時点は、試行毎に目視で確認し、必要に応じて修正を加えた(Vidal et al., 2000)。反応時間は、刺激提示時点からキー上げ時点までを ms 単位で計測し、条件間で比較した。

得られた EEG には 0.1 – 30 Hz (roll-off 12 dB) のバンドパスフィルタを適用した。EEG は EMG 開始時点トリガにしてその前 700 ms、後 700 ms の合計 1400 ms 区間を切り出した。EEG に重畳した瞬目は Gratton 法(Gratton et al., 1983)によって修正した。その後、 $\pm 100 \mu\text{V}$  以上の電位変動が生じた試行及び体動由来のアーチファクト混入試行を除外したうえで、EMG 開始時点トリガに EEG を加算平均した。

頭皮上分布に基づき、ERN 振幅値は FCz 電極(Biosemi 電極 C23)で計測し、Pe 振幅値は CPz 電極(Biosemi 電極 A3)で計測した。ERN 振幅値は、エラー反応前 300 – 200 ms 区間の平均電位を基線とし、エラー反応後から 150 ms までの区間における最大陰性電位を計測した(base to peak 法)。Pe 振幅値は、エラー反応後 250 – 450 ms の区間平均電位を計測した。N2 振幅値は FCz 電極(Biosemi 電極 C23)で計測した。N2 振幅値は、刺激提示前 100 ms 間の平均電位を基線と、刺激提示後 100 – 300 ms 間の最大陰性電位を測定した(base to peak 法)。

平均反応時間については、条件(高罰/低罰/統制)の 1 要因分散分析に供した。平均エラー率については、条件(高罰/低罰/統制)  $\times$  エラー試行(エラー/部分エラー)の 2 要因分散分析に供した。ERN の振幅値(FCz)は条件(高罰/低罰/統制)  $\times$  エラー試行(エラー/部分エラー)の 2 要因分散分析に供した。Pe 振幅値は、条件(高罰/低罰/統制)の 1 要因分散分析に供した。N2 の振幅値(FCz)は条件(高罰/低罰/統制)  $\times$  試行(Go 正反応

/No-go 正反応/No-go 部分エラー/No-go エラー)の 2 要因分散分析に供した。多重比較は Bonferroni 法を用いた。

### 第 3 章 結果

#### 行動指標

各条件における平均反応時間は、高罰条件で 273 ms ( $SEM = 5.3$ ), 低罰条件で 271 ms ( $SEM = 5.2$ ), 統制条件で 269 ms ( $SEM = 5.5$ )であった。反応時間について 1 要因分散分析を実施した結果、条件間で差はなかった( $F(2, 32) = 1.58, n. s.$ )。各条件における平均エラー数は、高罰条件で 22 個( $SEM = 3.3$ ), 低罰条件で 24 個( $SEM = 3.6$ ), 統制条件で 29 個( $SEM = 3.6$ )であった。各条件における平均部分エラー数は、高罰条件で 32 個( $SEM = 2.2$ ), 低罰条件で 35 個( $SEM = 2.5$ ), 統制条件で 35 個( $SEM = 2.0$ )であった。2 要因分散分析を実施した結果、条件の主効果が認められた( $F(2, 32) = 7.09, p < .01, \eta^2_p = .31$ )。下位検定の結果、統制条件よりも高罰条件のほうが少なかった( $p < .05$ )。統制条件と低罰条件、高罰条件と低罰条件の間に差はなかった(それぞれ  $p = .31, p = .17$ )。またエラー試行よりも部分エラー試行のほうが多かった( $F(1, 16) = 7.49, p < .05, \eta^2_p = .32$ )。交互作用は認められなかった( $F(2, 32) = 1.63, n. s.$ )。

#### EMG 同期 ERP

Figure 3-2 は、エラー試行及び部分エラー試行における FCz の総加算波形を示している。エラー試行での各条件の ERN 振幅値は、高罰条件で  $-6.5 \mu V$  ( $SEM = 0.8$ ), 低罰

条件で  $-7.2 \mu\text{V}$  ( $SEM = 1.1$ ), 統制条件で  $-7.1 \mu\text{V}$  ( $SEM = 0.9$ )であった。部分エラー試行での各条件における ERN 振幅値は, 高罰条件で  $-7.4 \mu\text{V}$  ( $SEM = 0.7$ ), 低罰条件で  $-6.5 \mu\text{V}$  ( $SEM = 0.7$ ), 統制条件で  $-7.40 \mu\text{V}$  ( $SEM = 0.9$ )であった。2 要因分散分析の結果, 部分エラーERN と ERN との間に差はなかった( $F < 1$ )。また条件間に差はなかった( $F < 1$ )。交互作用は認められなかった( $F(2, 32) = 1.41, n. s.$ )。

各条件における ERN の平均潜時は, 高罰条件で  $137 \text{ ms}$  ( $SEM = 5.9$ ), 低罰条件で  $13 \text{ ms}$  ( $SEM = 8.3$ ), 統制条件で  $133 \text{ ms}$  ( $SEM = 6.3$ )であった。また各条件における平均部分エラーERN の潜時は, 高罰条件で  $102 \text{ ms}$  ( $SEM = 4.6$ ), 低罰条件で  $102 \text{ ms}$  ( $SEM = 4.0$ ), 統制条件で  $108 \text{ ms}$  ( $SEM = 4.0$ )であった。2 要因分散分析の結果, ERN よりも部分エラーERN の潜時のほうが早かった( $F(1, 16) = 60.60, p < .001, \eta_p^2 = .79$ )。条件の主効果及び交互作用は認められなかった( $F_s < 1$ )。



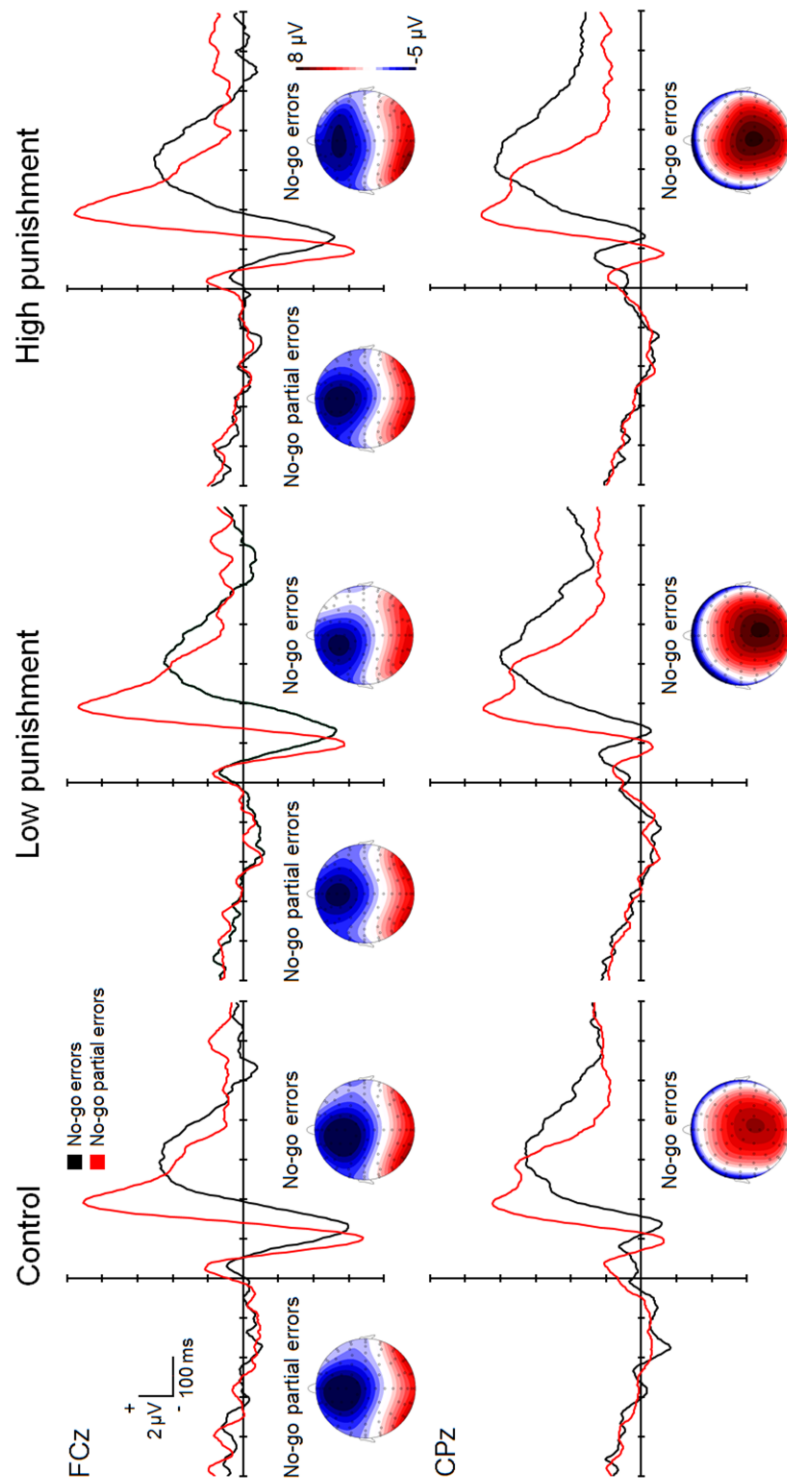


Figure 3-2. FCz, CPz における EMG 同期 ERP の条件間及び試行間比較．頭皮上分布は, ERN (100 – 150 ms)と部分エラーERN (70 – 120 ms)を示す．CPz の頭皮上分布は, Pe (250 – 450 ms)を示す．

各条件における Pe 振幅値は，高罰条件で  $7.4 \mu\text{V}$  ( $SEM = 1.0$ )，低罰条件で  $6.9 \mu\text{V}$  ( $SEM = 0.8$ )，統制条件で  $5.8 \mu\text{V}$  ( $SEM = 0.9$ )であった．部分エラーでは Pe は惹起しなかった．1 要因分散分析の結果，条件の主効果が認められた( $F(2, 32) = 5.13, p < .01, \eta^2_p = .24$ )．下位検定の結果，Pe 振幅値は統制条件よりも高罰条件のほうが大きかった( $p < .01$ )．しかし低罰条件と統制条件，低罰条件と高罰条件の間に差はなかった(それぞれ  $p = .12, p = 1.0$ )．

Figure 3-3 は，各条件及び各試行での刺激同期 ERP を示している．N2 振幅値について 2 要因分散分析を実施した結果，試行の主効果が認められた( $F(3, 48) = 30.66, p < .001, \eta^2_p = .66$ )．No-go 試行及び Go 試行の正反応よりも部分エラーのほうが N2 は有意に大きかった( $ps < .001$ )．エラーと部分エラーの間に差はなかった( $p = 1.00$ )．さらに，No-go 試行と Go 試行の正反応の間に差はなかった．交互作用は認められなかった( $F(6, 96) = 1.23, n. s.$ )．

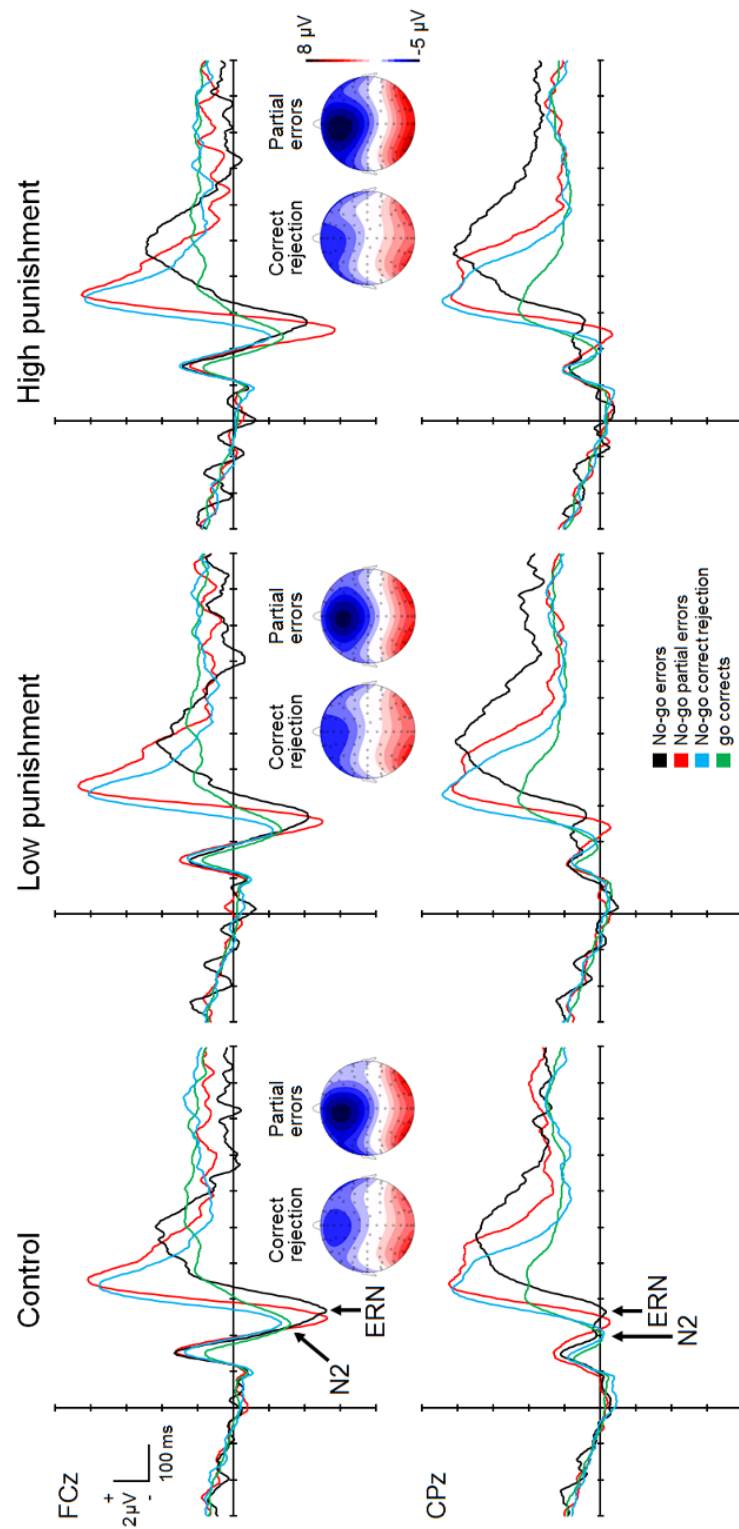


Figure 3-3. FCz, CPzにおける刺激同期ERPの条件間及び試行間比較. 頭皮上分布は, 部分エラーで 230 – 280 ms, No-go 試行の正反応で 210 – 260 ms を示す. No-go error はNo-go 試行のエラー反応, No-go parital errors はNo-go 試行の部分エラー反応, No-go correct rejection は No-go 試行の正反応, go corrects は Go 試行の正反応を示す.

## 第4章 考察

本実験では、エラーモニタリングに及ぼす金銭罰の効果を検証した。エラー率は統制条件よりも高罰条件で低下した。反応時間は条件間で差がなかったことから、反応の速さと正確さとの間にトレードオフが起こっていたとは考え難い。この結果は、罰の随伴に伴って回避動機が高まったことを示しており、金銭罰の影響を認めなかった知見(Boksem et al., 2008; Stürmer et al., 2011)とは異なった。

本研究では、金銭罰に伴うエラー検出機能の亢進が ERN を増大させる可能性と、実験1の聴覚性罰と同様、金銭罰はエラー検出に影響を及ぼさない可能性を予測した。実験の結果、ERNに条件間の差はなく、後者の予測を支持した。しかしながら金銭罰の随伴によってERNが大きくなるという報告と合致しなかった(Endrass et al., 2010)。この知見の不一致から、金銭罰の随伴はエラー検出を一様に高めるとは言い難い。罰を伴う ERN 振幅値の変動は、文脈・状況に依存するのかもしれない(Weinberg et al., 2012)。

部分エラーERN と ERN との比較では振幅値に差はなく, Carbonnell and Falkenstein (2006)と Scheffers, Coles, Bernstein, Gehring, and Donchin (1996)の結果に合致した。しかしながら、部分エラーERNのほうがERNよりも小さくなるという報告も多い(e.g., Vidal et al., 2000; Masaki & Segalowitz, 2004)。知見の不一致は、部分エラーの同定が筋活動の視察に基づいて行われることに起因したものかもしれない。エラー筋電位の大きさは部分エラーERNの振幅値に反映され得るため、微弱な部分エラーを同定できた研究ほど部分エラーERNは低振幅となる。しかしながら本研究では、第3指

の伸展運動による反応を採用し、微弱な筋電位を観察可能としたため、部分エラーの見落としによる結果とは考え難い。別の可能性として、部分エラーERN と ERN の神経機序は共通であることから(Vidal et al., 2000; 2003), 正反応に分類される部分エラーに対してもエラー検出機構はエラーと同程度に機能したのかもしれない。

本実験では Go/No-go 課題を採用したことも考慮すべきである。Go/No-go 課題の部分エラーERN には No-go N2 が重畳する(岩木, 1998)。No-go N2 を評価するため、本研究では刺激同期 ERP も算出した。その結果、エラー試行では(Fig. 3-3, 黒色波形), CPz において N2 に相当する陰性成分が 2 つ同定された。刺激提示後 200 ms 付近に観察された陰性成分は、正反応の N2 (Fig. 3-3, 青色波形)と潜時が一致した。一方、潜時の異なる陰性成分が刺激提示後 300 ms 付近に観察された。視察に基づくと、エラー試行では ERN と No-go N2 の重畳はなかったと結論づけられる。一方、部分エラー試行では(Fig. 3-3, 赤色波形), 陰性成分は 1 つだけであった。部分エラー試行では No-go N2 が ERN に重畳し、単峰性の複合波となったものと推察される。部分エラーERN と ERN との間で振幅値に差がなかった結果は、部分エラーERN に No-go N2 が重畳したためかもしれない。

N2 は Go 試行よりも No-go 試行で増大することが報告されている(e.g., Pfefferbaum, Ford, Weller, & Kopell, 1985)。本実験で部分エラーを取り除いた結果、N2 は Go 試行と No-go 試行で差はなかった(Fig. 3-3, FCz における緑色波形と青色波形)。したがって、従来報告されてきた No-go N2 は、部分エラーの混入によって部分エラーERN が N2 と複合化したに過ぎない可能性を指摘できよう。

Pe は統制条件よりも高罰条件で大きかった。Pe はエラーの主観的評価と関係することから(Endrass, Klawohn, Schuster, & Kathmann, 2008; Falkenstein et al., 1995; Hewig et al., 2011; Leuthold & Sommer, 1999; Overbeek et al., 2005), 金銭罰の随伴によってエラー評価が高まったことを示唆している。一方, 低罰条件と統制条件との間には差がなかった。エラー率も低罰条件と統制条件で差がなかったことから, 低罰の随伴では回避動機は高まらないことが示唆された。高罰の随伴ではエラー率は統制条件より低く, Pe は回避動機に基づくエラー評価の強化を反映したものと解釈できる。

本実験から, 反応結果に金銭罰を随伴した場合, ERN は影響を受けないことが明らかとなった。条件, エラーの種類に関わらず, エラー検出機構は堅固に駆動することが示唆された。また, 部分エラーERNに No-go N2 が重畳する可能性も指摘した。Pe は金銭罰回避によるエラー評価の高まりを反映し増大した。Pe の結果は, 金銭罰からの回避動機に基づくエラー評価の増大を反映したものと考えられた。金銭罰を回避し, 行動を最適化していく基礎には, エラー評価過程の存在があるといえよう。

## 第 4 部 実験 3 金銭罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響

### 第 1 章 目的

実験 1 では聴覚性罰を用い、実験 2 では金銭罰を用いることで、罰の随伴によってエラー評価が高まることを明らかにした。しかしながら、エラーモニタリングに及ぼす情動・動機づけの効果を明らかにするためには、エラー反応への罰随伴だけでなく、正反応への報酬随伴の効果も検討しなければならない。そこで実験 3 では、金銭罰及び報酬の随伴がエラーモニタリングに及ぼす影響を検討した。空間ストループ課題を用いて、エラー反応毎に 50 円の損失が生じる罰条件、正反応毎に 5 円の獲得が生じる報酬条件、報酬も罰もない統制条件の 3 条件を比較した。金銭罰及び報酬がエラー検出を高めるのであれば(Hajcak et al., 2005; Endrass et al., 2010)、統制条件よりも報酬条件で ERN 振幅値は増大することが予測される。また罰随伴と同様に金銭報酬もエラー評価過程を強化させるのであれば、統制条件よりも報酬条件で Pe 振幅値は増大するはずである。実験 3 でも実験 2 と同様、正反応試行でのエラーモニタリングを検討するために部分エラーを分析した。部分エラーERN が ERN と共通の神経機序を有するのであれば(Vidal et al., 2000; 2003)、部分エラーERN に及ぼす金銭罰及び報酬の効果は ERN と同様のはずである。さらに、罰及び報酬に対する反応性の個人差がエラーモニタリングに及ぼす効果も検討した。金銭罰を操作した従来の研究(Boksem et al., 2008)に基づくと、罰条件では BIS の高得点者ほど ERN 振幅値は大きいことが予測される。統制条件では Santesso and Segalowitz (2009)同様、BAS

の高得点者ほど ERN 振幅値は小さいことが予測される。

## 第 2 章 方法

実験参加者 心身ともに健常な女性大学生 24 名を対象とした。本研究は早稲田大学倫理委員会より承認を受けた。脳波のアーチファクトのため解析から 1 名除外し、最終的な解析対象は 23 名であった(平均年齢は 20.7 歳,  $SEM = 0.31$ )。

手続き 実験には実験 1 と同様の空間ストループ課題(Masaki & Segalowitz, 2004)を用いた。注視点(視覚  $1.1^\circ \times 1.1^\circ$ )提示の 300 ms 後に、注視点の上下いずれかの位置に、上下いずれかの方向を指す白色矢印(視覚  $1.1^\circ \times 0.6^\circ$ )を 150 ms 間ランダムに提示した。課題は、矢印刺激の提示位置を無視し、矢印の方向に対してキー上げで反応することであった。反応を測定するため、木製フラットボード上にマイクロスイッチを縦配列させ、左右第 3 指の伸展動作でスイッチが入るようにした。提示刺激は、矢印の方向と提示位置が同じ刺激を一致試行(congruent 以下 C 試行)、矢印の方向と提示位置が異なる刺激を不一致試行(incongruent 以下 IC 試行)とした。エラー反応が生じた際にフィードバックを提示しなかった。また、刺激提示後 500 ms 以内に反応できなかった場合には、刺激提示後 1000 ms に白色で「Too Late !」の文字を 500 ms 間提示した。

実験では、エラー反応に金銭損失を随伴させる罰条件と正反応に金銭獲得を随伴させる報酬条件、金銭の獲得も損失もない統制条件の 3 条件を設定した。罰条件では、元金を 2000 円とし、エラー反応もしくは無反応毎に 50 円の損失が生じた。正



反応では金銭の獲得はなかった。報酬条件では、元金を 0 円とし、正反応毎に 5 円の報酬が獲得できた。エラー反応では金銭の損失はなかった。統制条件では報酬の獲得も減額もなく課題を遂行するのみであった。実験参加者は、実験参加費に課題で獲得もしくは損失した金額が加算もしくは減算されることを伝えられた。各条件とも 72 試行を 1 ブロックとし連続 6 ブロック遂行した。ブロック終了毎に休憩を適宜設定した。条件の提示順序は実験参加者間でカウンタバランスをとった。実験終了後には別室で日本語版 BIS/BAS 尺度(高橋他, 2007)を用いて BIS/BAS を計測した。

記録方法 EEG 及び EOG の記録方法は実験 1 と同様であった。さらに EMG 測定用の電極を左右腕橈骨筋 2 箇所(電極間距離は 3 cm)に装着し、EMG を記録した。

分析方法 EMG の立ち上がりを決定するために -700 ms から -500 ms の平均電位を基線とし、基線から 4.0 SD を超えた EMG 活動を Brain Vision Analyzer によって自動同定した。自動同定された EMG の立ち上がり時点は、試行毎に目視で確認し、必要に応じて修正を加えた(Vidal et al., 2000)。反応時間は、刺激提示時点からキー上げ時点までを ms 単位で C 試行と IC 試行別に計測し、条件間で比較した。刺激提示時点から EMG の立ち上がりまでの時間を EMG 反応時間として条件間で比較した。

EEG はオフラインで 30 Hz (roll-off 12 dB)のローパスフィルタを適用した。EEG は EMG 開始時点トリガにしてその前 600 ms、後 700 ms の合計 1300 ms 区間を切り出した。EEG に重畳した瞬目は Gratton 法(Gratton et al., 1983)によって修正した。その後、 $\pm 100 \mu\text{V}$  以上の電位変動が生じた試行及び体動由来のアーチファクト混入試行を除外したうえで、EMG 開始時点トリガに EEG を加算平均した。得られた ERP

にはさらに 0.1 Hz (roll-off 12 dB)のハイパスフィルタを適用した。

頭皮上分布に基づき，ERN 振幅値は FCz 電極(Biosemi 電極 C23)で計測し，Pe 振幅値は CPz (Biosemi 電極 A3)で計測した．ERN 振幅値は，エラー反応前 100 ms からエラー反応後 150 ms までの区間における最大陰性電位と，その直前の最大陽性電位との差分値を計測した(peak to peak 法)．Pe 振幅値は，エラー反応前 400 – 300 ms 区間の平均電位を基線とし，エラー反応後 300 – 450 ms の区間平均電位を計測した．

平均反応時間及び平均エラー率については，条件(罰/報酬/統制) × 刺激整合性(C/IC)の 2 要因分散分析に供した．ERN 振幅値(FCz)は，条件(罰/報酬/統制) × エラー試行(エラー/部分エラー)の 2 要因分散分析に供した．Pe 振幅値は，条件(罰/報酬/統制)の 1 要因分散分析に供した．多重比較は Bonferroni 法を用いた．

BIS/BAS 得点は，ERP 振幅値及び行動指標との相関分析に用い，ピアソンの積率相関係数を算出した．

### 第 3 章 結果

#### 行動指標

Figure 4-1 は，各条件の C 試行と IC 試行の平均反応時間，平均エラー率を示している．反応時間について 2 要因分散分析を実施した結果，IC 試行のほうが C 試行よりも反応時間は有意に長かった( $F(1, 22) = 464.94, p < .001, \eta^2_p = .96$ )．しかしながら条件間の主効果は傾向であった( $F(2, 44) = 2.71, p < .10, \eta^2_p = .11$ )．交互作用は認められなかった( $F < 1$ )．

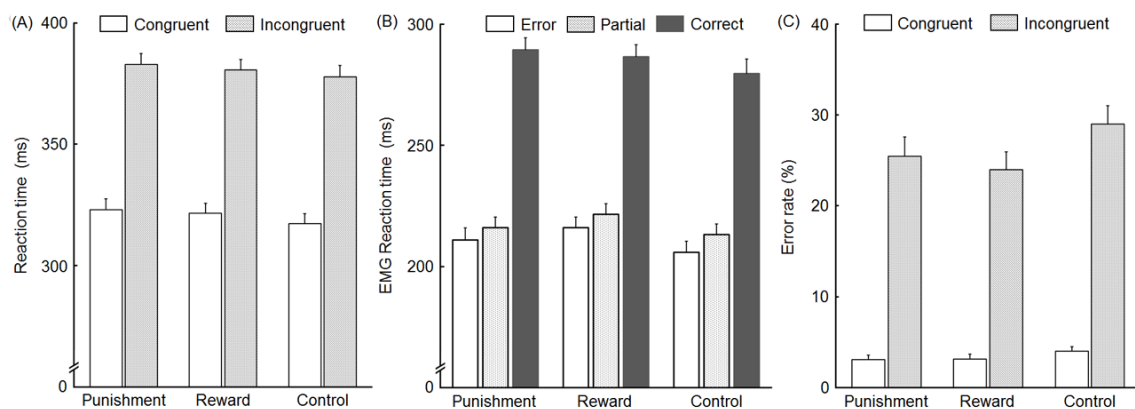


Figure 4-1. 一致試行と不一致試行における平均反応時間の条件間比較(A). 不一致試行におけるエラー試行, 部分エラー試行, 正試行の EMG 反応時間(B). 一致試行と不一致試行におけるエラー率の条件間比較(C). エラーバーは SEM を示す.

## EMG 反応時間

EMG 反応時間について 2 要因分散分析を実施した結果, 条件の主効果が認められた( $F(2, 44) = 7.52, \epsilon = .80, p < .001, \eta^2_p = .26$ ). 下位検定の結果, EMG 反応時間は, 統制条件( $M = 233$  ms)よりも罰条件( $M = 239$  ms)や報酬条件( $M = 241$  ms)で有意に早かった(それぞれ  $p < .05, p < .001$ ). 反応種類の主効果も有意であった( $F(2, 44) = 350.0, \epsilon = .78, p < .001, \eta^2_p = .94$ ). 下位検定の結果, エラー試行( $M = 211$  ms)は, 正試行よりも反応が早かった ( $M = 285$  ms,  $p < .01$ ). 部分エラー試行の RT ( $M = 217$  ms)は, 正試行よりも反応が早かった ( $p < .01$ ). エラー試行は, 部分エラー試行よりも反応が早い傾向にあった( $p < .10$ ).

## PES

1 要因分散分析を行った結果, 条件間の主効果が有意だった( $F(2, 44) = 5.89, p < .01$ ,

$\eta^2_p = .21$ ). 下位検定の結果、報酬条件( $M = 8.1$  ms)では、統制条件( $M = -1.6$  ms)や罰条件( $M = -2.8$  ms)よりも PES の遅延が認められた( $ps < .05$ ). 罰条件と統制条件との間に差はなかった( $p = 1.0$ ).

#### エラー率

IC 試行におけるエラー数は、報酬条件で 51.8 回( $SEM = 4.3$ ), 罰条件で 55.0 回( $SEM = 4.6$ ), 統制条件で 62.7 回( $SEM = 4.5$ )であった. C 試行でのエラー数は、報酬条件で 6.8 回( $SEM = 1.2$ ), 罰条件で 6.7 回( $SEM = 1.1$ ), 統制条件で 8.7 回( $SEM = 1.1$ )であった. 2 要因分散分析を行った結果、IC 試行のほうが C 試行よりもエラー率は有意に高かった( $F(1, 22) = 196.92, p < .001, \eta^2_p = .90$ ). 条件の主効果も有意であった( $F(2, 44) = 6.40, \varepsilon = .99, p < .01, \eta^2_p = .23$ ). 下位検定の結果、エラー率は統制条件に比較して罰条件( $p < .05$ )と報酬条件( $p < .05$ )で低かった. 交互作用は認められなかった( $F < 1$ ).

IC 試行における部分エラー数は、報酬条件で 43.2 回( $SEM = 3.3$ ), 罰条件で 45.2 回( $SEM = 3.2$ ), 統制条件で 48.9 回( $SEM = 3.2$ )であった. 1 要因分散分析を行なった結果、条件の主効果は有意傾向であった( $F(2, 44) = 2.88, p = .07, \eta^2_p = .12$ ).

#### EMG 同期 ERN, Pe

Table 4-1 では、各条件でのエラー試行と部分エラー試行の ERN 振幅値を示している. Figure 4-2 は、エラー試行での FCz, CPz の総加算波形を示している. Figure 4-3 は、部分エラーにおける FCz と CPz での EMG 同期 ERP 波形を示している. 2 要因

分散分析の結果，条件の主効果が認められた( $F(2, 44) = 8.48, p < .01, \eta^2_p = .28$ )．下位検定の結果，ERN 振幅値は，統制条件よりも報酬条件( $p < .05$ )及び罰条件( $p < .01$ )のほうが大きかった．報酬条件と罰条件との間に差はなかった( $p = .68$ )．また部分エラー試行よりもエラー試行のほうが ERN は有意に大きかった( $F(1, 22) = 4.30, p < .05, \eta^2_p = .16$ )．条件とエラー種類の交互作用はなかった( $F < 1$ )．

部分エラー試行では Pe は惹起しなかった．Pe について 1 要因分析を行った結果，条件の主効果が認められた( $F(2, 44) = 3.40, p < .05, \eta^2_p = .13$ )．下位検定の結果，Pe 振幅値は統制条件に比較して罰条件で大きかった( $p < .05$ )．報酬条件と罰条件( $p = .88$ )，報酬条件と統制条件( $p = .48$ )の間には有意差はなかった．

Table 4-1. 各条件における ERN と Pe 振幅値( $\mu V, SEM$ )

	Punishment	Reward	Control
ERN (full error)	-10.4 (0.84)	-10.1 (0.73)	-9.0 (0.71)
ERN (partial error)	- 9.5 (0.76)	- 9.1 (0.67)	-8.2 (0.56)
Pe (full error)	4.0 (0.48)	3.5 (0.56)	2.8 (0.40)

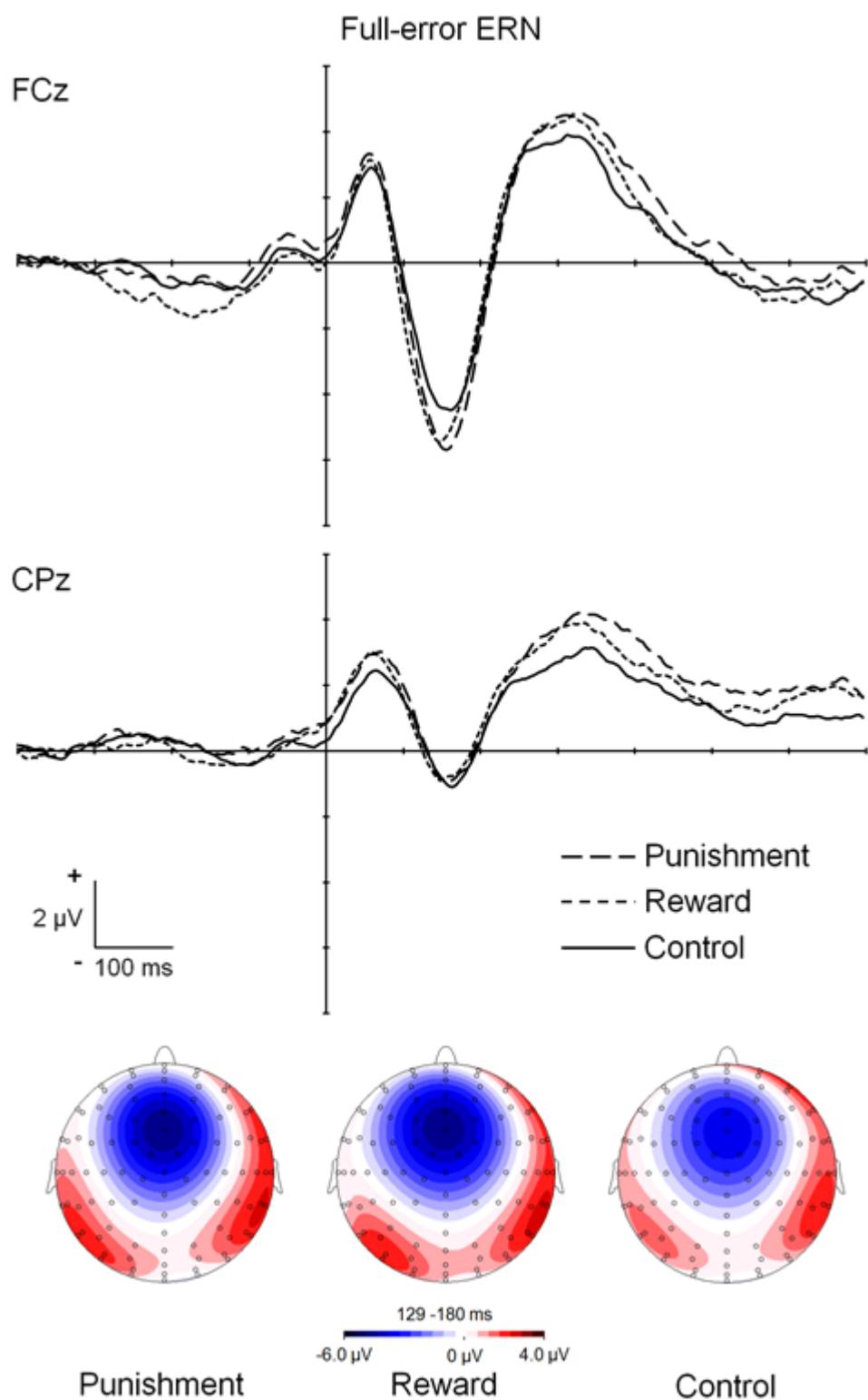


Figure 4-2. FCz と CPz におけるエラー反応同期 ERP の条件間比較. 頭皮上分布は, ERN のピーク前後の 50 ms を示す.

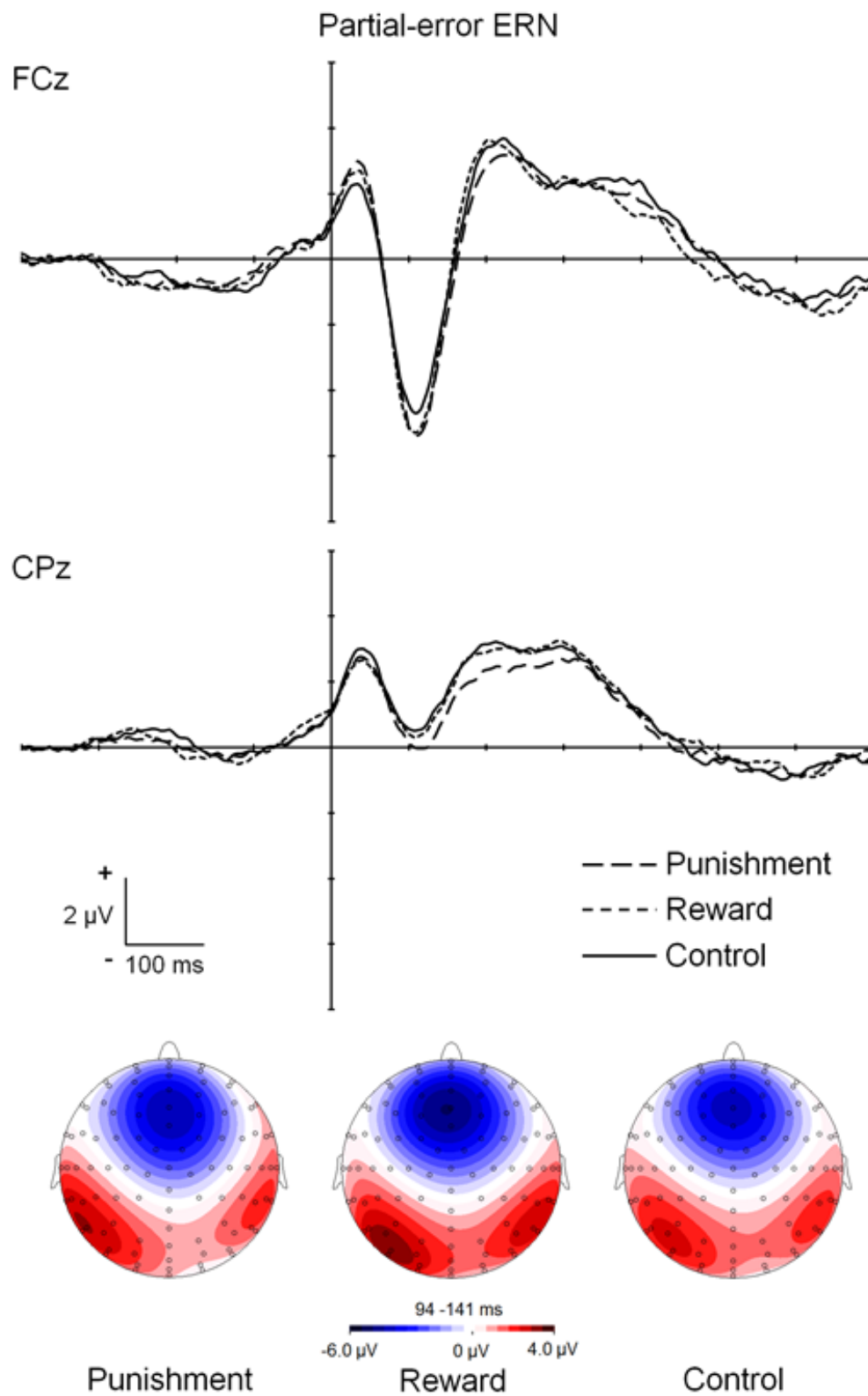


Figure 4-3. FCz と CPz における部分エラー同期 ERP の条件間比較. 頭皮上分布は, ERN のピーク前後の 50 ms を示す.

## BIS/BAS との相関関係

BIS 得点と ERN 振幅値の相関関係を検討した結果、どの条件においても相関関係は認められなかった( $r_s \leq -.20$ ). さらに BIS 得点と部分エラーERN との間にも相関関係はなかった( $r_s \leq -.30$ ). 同様に BIS 得点と Pe との間に相関関係はなかった( $r_s \leq -.30$ ).

一方, BAS 得点と ERN 振幅値の相関関係を検討した結果, すべての条件で BAS と ERN 振幅値の相関関係が認められた(罰条件:  $r = .44, p < .05$ , 報酬条件:  $r = .53, p < .01$ , 統制条件:  $r = .57, p < .01$ ; Fig. 4-4). しかしながら, BAS 得点と部分エラーERN との間には相関関係はなかった(罰条件:  $r = .18, p = .40$ , 報酬条件:  $r = .36, p < .10$ , 統制条件:  $r = .22, p = .31$ ).

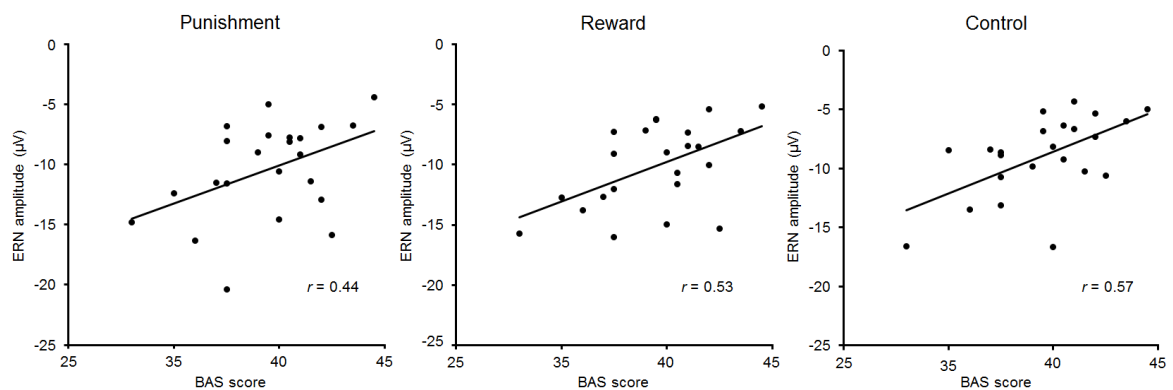


Figure 4-4. 各条件における ERN 振幅値と BAS 得点の相関図

BAS の下位尺度と ERN の相関関係についても検討した. BAS-R 得点と, 報酬条件及び統制条件の ERN との間に有意な相関関係が認められた ( $r = .49, p < .05$ ;  $r = .56, p < .01$ ). BAS-R 得点と罰条件の ERN との間に相関関係はなかった( $r = .40, p = .06$ ). BAS-F 得点と ERN との間にはいずれの条件でも相関関係はなかった( $r_s < .45$ ).



BAS-D 得点と ERN との間にも相関関係は認められなかった( $r_s < .30$ ).

BAS 得点と Pe 振幅値との間に相関関係は認められなかった( $r_s \leq .20$ ). また BAS 下位尺度と Pe の間にも相関関係はなかった( $r_s < .35$ ).

#### 第 4 章 考察

本実験では、エラーモニタリングに及ぼす金銭罰と報酬の効果を検証した。エラー率は統制条件よりも罰条件と報酬条件で低下した。この結果は、罰及び報酬の随伴に伴ってエラーの重要性が高まったことを示している。また PES は報酬条件で有意に長く、金銭報酬がエラー後の補償行動を促進させた。

ERN は、統制条件よりも罰条件と報酬条件で大きかった。ERN はエラー検出を反映することから(e.g., Gehring et al., 1993), 金銭罰及び報酬の随伴によってエラー検出は高まることが示唆された。従来の研究でも金銭罰及び報酬によって ERN は増大しており(Endrass et al., 2010; Hajcak et al., 2005; Potts, 2011), 本実験の結果もエラーの重要性を反映したものと解釈される。

部分エラーERN は、統制条件よりも報酬条件と罰条件で大きかった。独立成分分析(independent component analysis: ICA, Onton, Westerfield, Townsend, & Makeig, 2006)を適用した研究によれば、部分エラーERN は ERN と共通の神経機序を有するという(Roger, Bénar, Vidal, Hasbroucq, & Burle, 2010). また電流源密度推定法(current source density: CSD, Perrin, Bertrand, & Pernier, 1987)を適用した研究でも、部分エラーERN と ERN の発生源は共通することが示唆されている(Vidal et al., 2000; 2003). そのため,

本研究で観察された部分エラーERNの増大は、ERN同様に、エラーの重要性の高まりを反映したものと解釈できる。部分エラーは、行動上は正反応に分類されてもエラー検出機構からはエラー反応として同定されるといえよう。

Rochet et al. (2013)によると、実験参加者はほとんどの部分エラーに気づいていないという。Peはエラーの気づき及び評価を反映することから(Overbeek et al., 2005), 部分エラー試行ではPeは惹起しない(Vidal et al., 2000)ことは理解できる。本実験でも、部分エラー試行でPeは惹起しなかった理由は、エラーへの気づきが生じなかったためであろう。

Peは統制条件よりも罰条件で増大した。この結果は、金銭罰に伴うPe増大を報告した知見(Endrass et al., 2010)と合致する。罰条件でのPe増大は、回避動機に基礎を置くエラー評価の意義上昇に起因したものと解釈できる。

PESは統制条件と罰条件に比べて報酬条件で遅延した。罰よりも報酬随伴のほうがPESを延長させる(Stürmer et al., 2011)ことは知られており、本実験でも、金銭報酬がエラー後の行動調節を強化したと考えられる。

行動賦活及び抑制に対する個人差とERPとの関連を検討した結果、条件に関わらずERN振幅値とBAS得点との間に正の相関関係が認められた。Boksem et al. (2008)は、エラー反応に金銭罰を随伴させた場合、ERN振幅値とBAS下位尺度のBAS-Rとの間に正の相関関係を見いだした。さらにSantesso and Segalowitz (2009)は、報酬に対する反応性が高いほどERN振幅値は小さくなることを報告した。本実験では、罰及び報酬の随伴に関わらずERNとBASとの関係性が認められ、エラー検出は報

酬に対するポジティブな反応に関係していることが明らかとなった。

Gray et al. (2005)は、BAS の高い者ほど ACC 活動が低いことを報告している。同一課題を行う時でも、報酬接近動機の強い者ほど ACC を活動させることなく課題を遂行できるのかもれない。したがって本実験の BAS 高得点者も、課題を効率よく遂行するためにエラー検出よりも次試行での正反応実現を重視していた可能性がある。

本実験の結果から、反応結果に金銭罰及び報酬を随伴した場合、ERN 及び部分エラーERN は増大することが明らかとなった。この結果は金銭罰及び報酬によってエラー検出の重要性が高まったことに起因している。Pe については、金銭罰回避の基礎となる情動・動機づけ処理によって増大が生じた。エラーの反復を防止するにはエラー評価が重要であり、Pe の機能的意義はここにあるといえよう。

## 第5部 総合論議

本博士学位論文では、ERN だけでなく  $Pe$  と部分エラーERN を測定することで、罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響を調べた。以下の目的について順次実験で検討した：①エラーモニタリングに及ぼす聴覚性罰の影響（実験1）、②エラーモニタリングに及ぼす金銭罰の大きさの影響（実験2）、③エラーモニタリングに及ぼす金銭罰と報酬の影響（実験3）。ここでは、一連の実験で得られた結果から動機づけ処理とエラーモニタリングとの関係について総合的に論議する。

実験1では実験参加者は、矢印の提示位置を無視し矢印の方向に対して反応する空間ストループ課題を遂行した。その際、エラー反応に聴覚性罰の随伴させる罰条件と、罰のない統制条件を設定した。ERNに条件間の差はなかったものの、 $Pe$ は統制条件よりも罰条件で増大した。この結果は、罰に対する回避動機によってエラー評価が高まることを示唆している。さらに報酬及び罰に対する反応性をBIS/BAS尺度で評価し、エラーモニタリングとの関連性を検討した。その結果、BASと $Pe$ との間に負の相関が認められ、報酬に動機づけられている者ほどエラー評価は低かった。

実験2では、実験参加者はGo/No-go課題を遂行した。ここでは、高頻度提示されるGo刺激に反応し、低頻度提示されるNo-go刺激には反応を抑制した。エラー反応に高額のコスト損失を随伴させる高罰条件と、小額のコスト損失を随伴させる低罰条件、エラーによって金銭の獲得も損失も生じない統制条件を設定した。実験の結果、ERNや部分エラーERNは条件間で差がなかった。一方、 $Pe$ は統制条件よりも高罰条件で増大した。実験1同様、本結果もコスト損失を伴うエラーの回避動機によってエラー

評価が高まることを示唆している。

実験 3 では、実験参加者は空間ストループ課題を遂行した。エラー反応毎に金銭を損失する罰条件と、正反応毎に金銭を獲得する報酬条件、金銭の獲得も損失もない統制条件を設定した。実験の結果、ERN と部分エラーERN は、統制条件よりも報酬条件や罰条件で増大した。一方、 $Pe$  は統制条件よりも罰条件で増大したが、統制条件と報酬条件との間に差はなかった。この結果は、エラーの種類(明瞭なエラーや部分エラー)に関わらず、エラーの重要性の高まりがエラー検出に反映されることを示している。また、金銭損失に対する回避動機によってエラー評価が高まることを示唆している。さらに、報酬及び罰に対する反応性とエラーモニタリングとの関連性を検討した結果、BAS 尺度と ERN との間に正の相関を認め、報酬に動機づけられている者ほどエラー検出は低下することが示唆された。

## 第 1 章 罰及び報酬がエラーモニタリングに及ぼす影響

一連の実験結果から、聴覚性罰及び金銭罰によって  $Pe$  は増大することが明らかとなった。聴覚性罰がエラーモニタリングに及ぼす影響を検討した研究では、罰条件と統制条件で  $Pe$  振幅値に差がみられていない(Elkins-Brown et al., 2016; Riesel et al., 2012)。しかしながら、Elkins-Brown et al. (2016)は、罰条件で聴覚性刺激(95 dB のビープ音)が実験参加者にとって罰になっていなかった可能性を指摘しており、エラー検出過程に及ぼす聴覚性罰の効果は不明確であった。一方、実験 1 で用いた聴覚性罰は、SAM によって主観的評価を行い実験参加者が不快に感じていたことを確認し

ている。これらの結果から、実験 1 で観察された  $Pe$  増大は、聴覚性罰に対する回避動機の高まりがエラー評価処理を促進させたことに起因したものと解釈された。 $Pe$  増大は聴覚性罰で特異的に生じるものなのか、その他の罰刺激に対しても生じるものなのか、確認する必要があった。そこで実験 2 では罰のモダリティについて、金銭罰に注目することで検証した。ここでは金銭罰の大きさも操作した。その結果、エラー率は金銭罰によって低下し、 $Pe$  振幅値は統制条件に比べ高罰条件で有意に増大した。これらの結果は金銭罰からの回避動機に伴うエラー評価を反映したものと解釈された。実験 1, 2 から、罰の随伴によりエラー評価過程は増大し、罰のモダリティとは独立していることが示唆された。

エラー評価の高まりは罰随伴時に特異的に生じるものなのか、報酬随伴時でも同様に生じるものなのかを検討するため、実験 3 では金銭報酬を正反応に随伴させる条件を設定し、金銭罰条件、統制条件の 3 条件でエラーモニタリングを比較した。実験の結果、エラー率は統制条件よりも報酬条件で低かったものの統制条件と報酬条件との間に  $Pe$  振幅値の差はなかった。報酬条件ではエラーを回避しようとしていたもののエラー評価は促されなかったことを示唆している。一方、統制条件よりも罰条件でエラー率は低下し、 $Pe$  振幅値が増大することを示した。エラーモニタリングと情動・動機づけ処理との関係性を検討した従来の研究では、ERN に焦点を当てたものがほとんどであり、 $Pe$  に注目した研究は少ない。本研究の一連の実験結果は、罰に対する回避動機によってエラー評価過程が高まることを示している。

先行研究では、 $Pe$  がエラーの気づき・注意を反映すること (Nieuwenhuis et al., 2001;

Shalgi, et al., 2009; Steinhauser & Yeung, 2012)やエラーの評価過程を反映すること (Falkenstein et al., 2000; Nieuwenhuis et al., 2001; Ridderinkhof et al., 2009)が報告されている。これらの知見では、Pe と P300 との類似性が示唆されている(Falkenstein et al., 1991; Leuthold & Sommer, 1999; Ridderinkhof et al., 2009)。P300 は刺激の評価や注意を反映する刺激同期 ERP である(Donchin & Coles, 1988)。主成分分析を適用した研究では(Arbel & Donchin, 2009), エラー評価を反映する Pe には P300 が重畳していることを明らかにしている。これらの知見から、エラー反応は検出後に複合的かつ詳細に評価されるものと考えられる。

実験 1, 2 では、罰の随伴によってエラー検出過程は影響を受けなかった。従来の研究は、情動・動機づけ処理がエラー検出過程に反映されることを報告してきた(Endrass et al., 2010; Hajcak et al., 2005; Potts, 2011, Stürmer et al., 2011; Riesel et al., 2012)。一方、少数ながら、エラーに対する動機づけや重要性の高まりはエラー検出過程に影響を及ぼさないとする報告もある(Chiu & Deldin, 2007; Elkins-Brown et al., 2016; Groom et al., 2013; Pailing & Segalowitz, 2004)。このように、金銭報酬及び罰の随伴がエラー検出を一様に高めるとは言い難い。実験 1, 2 の知見は、罰の随伴が ERN に影響を及ぼさなかった知見と合致する。しかしながら実験 3 では、報酬及び罰の随伴によってエラー検出過程は増大した。ERN は正反応と比較するとエラー反応で堅固に生起する電位であるが、情動・動機づけ処理による振幅増大は文脈・状況に依存するのかもしれない(Weinberg et al., 2012)。

## 第2章 エラーモニタリングと性格特性の関連性

情動・動機づけ操作を検討した実験1及び実験3では、エラーモニタリング機能はBAS得点と関連していた。実験1では、BAS得点の高い者ほどPe振幅値は小さく、実験3ではBAS得点の高い者ほどERN振幅値は小さかった。両実験間には、フィードバックの有無やモダリティ(聴覚性罰、金銭罰報酬刺激)の差異があった。しかしながら、エラーモニタリング機能という包括的な概念に基づけば、BAS得点の高い者ほどエラーモニタリング機能の活動は低いことが示唆された。

先行研究によると、報酬に対する反応性が高い者ほどERNは小さく(Santesso & Segalowitz, 2009)、BAS低得点者よりもBAS高得点者のほうがACCの活動は低い(Gray et al., 2005)。また、BAS高得点者ほど正の感情を生起させやすく、課題遂行の効率性を重視する(Balconi & Crivelli, 2010)。本研究のBAS高得点者もエラーの詳細な評価よりも次試行での効率的な課題遂行を重視していた可能性が高い。また、同一課題を行う時でも、BAS高得点者はBAS低得点者に比べてACC活動を高めることなく課題を遂行できる(Gray et al., 2005)。BAS高得点者のこうした反応態勢や心的努力に関与する脳内情報処理は、不快音を随伴させた場合にはPeを減少させ、金銭罰・報酬を随伴させた場合にはERNを減少させるものと考えられる。

実験1及び実験3では、仮説に反してBISとERNの相関関係はなかった。先行研究は、BIS得点が高い者ほどERNは大きいことを報告している(Amodio et al., 2008; Boksem et al., 2006)。これらの結果は、罰に対して反応性が高い者ほどエラー検出処理も高いことを示している(Boksem et al., 2008)。知見の不一致は、実験手続きの差異



に起因するものかもしれない。Boksem et al. (2006)も Amodio et al. (2008)も、金銭罰・報酬を操作していない。さらに Boksem et al. (2008)は、参加者を2群に振り分け、罰群と報酬群を比較している。本研究のように罰及び報酬を参加者内で操作した場合には BIS と ERN との関係が表れ難くなるものと推察される。

### 第3章 エラーモニタリングの脳内機序

エラーモニタリングは、ACCを中心とした salience network(Seeley et al., 2007)が担っていると考えられている(Ullsperger et al., 2010; 2014)。先行研究から主な ERN の発生源として ACC が報告されている(Dehaene et al., 1994; van Veen & Carter, 2002)。また fMRI の研究によって ACC は、エラー検出との関連性が報告されている(Ullsperger et al., 2004; Ridderinkhof et al., 2004)。Ullsperger et al. (2004)は、フランカー課題を用いて速度強調条件のエラー試行よりも精度強調条件のエラー試行で ACC の賦活が大きいことを報告し、ACC がエラー検出に関わっていることを示唆している。

検出されたエラーは、前部島皮質(anterior insular cortex: AIC)で評価され则认为られている(Klein et al., 2007)。ACC と AIC との間に強い神経連絡があり、AIC はエラーの気づき・評価に関連していることが報告されている(Ullsperger et al., 2010)。Klein et al. (2007)は、fMRI によってサッカード課題中の脳活動を検討し、実験参加者にとって気づきのあるエラー試行で ACC, SMA, AIC の活動増大を報告した。一方気づきのないエラー試行では、ACC は活動していたものの AIC の活動が低下した。これらの知見は、AIC がエラーへの気づきの生起に重要な役割を果たすことを示唆

している。ACC がエラーを検出した後、AIC がエラーの気づきやエラーを評価することでエラー後の行動を修正しており (Ullsperger et al., 2010; 2014), ACC と AIC はエラーに関連して協調的に機能する (Seeley et al., 2007)。また AIC は情動との関連性が報告されており, 情動の高まりが AIC の活動増大に反映される (Bartels & Zeki, 2004)。

情動価の評価に関わる AIC は、青斑核–ノルアドレナリン系と強い神経接続があることが報告されている (Aston-Jones et al., 1991; Ullsperger et al., 2010)。青斑核ノルエピネフリン系の活動によって P300 が変動する知見 (Nieuwenhuis, Aston-Jones, & Cohen, 2005; Swick, Pineda, & Foote, 1994) や、Pe が P300 との複合成分であるという知見 (Arbel & Donchin, 2009) から、Pe の惹起には青斑核ノルエピネフリン系の関与も示唆される (Nieuwenhuis et al., 2005; Ridderinkhof et al., 2009)。Aston-Jones and Cohen (2005) によれば、エラー検出が ACC で行われた後、ACC の活動が青斑核にも伝えられエラーの評価を行っているという。これらの知見から、ACC で検出されたエラー反応は前部島皮質や青斑核ノルアドレナリン系で評価され、エラーの繰り返を防ぐエラーモニタリング機構が成り立っていると考えられる。

#### 第 4 章 今後の展望

本研究では、ERN, Pe を指標として聴覚性罰及び金銭罰、報酬を操作し、情動・動機づけ処理がエラーモニタリングに及ぼす影響を明らかにした。しかしながら、性格特性の個人差とエラーモニタリングとの関係性については明らかにできなかった。

エラーモニタリングは、種々の性格特性との関連性が報告されている。エラー検出機能は、不安や罰に対する反応性(Moser et al., 2013)や衝動性や報酬に対する反応性(Santesso & Segalowitz, 2009)と関連しており、個別性の高い情報処理過程なのかもしれない。また、情動・動機づけとエラーモニタリングとの関係は性格特性によって異なることが示唆されている(Boksem et al., 2008; Dikman & Allen, 2000; Pailing & Segalowitz, 2004)。実際のスポーツ場面でエラーをした時、そのエラーに対して激励すべきか叱咤すべきかは、選手の性格特性に応じた声かけが必要であろう。したがって、情動・動機づけと性格特性がエラーモニタリングに及ぼす影響はスポーツ心理学の観点からも重要な研究対象であり、今後明らかにしていかなければならない課題である。

ERN や Pe は時間分解能の優れた生理指標であるが、空間分解能は低い。先述した ACC から AIC や青斑核－ノルエピネフリンの神経機構とエラーモニタリングとの関連性を明らかにするためには、空間分解能の高い fMRI を用いた検討が必要である。

## 引用文献

- Aarts, K., & Pourtois, G. (2010). Anxiety not only increases, but also alters early error-monitoring functions. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 10, 479-492.
- Amodio, D. M., Master, S. L., Yee, C. M., & Taylor, S. E. (2008). Neurocognitive components of the behavioral inhibition and activation systems: Implications for theories of self-regulation, *Psychophysiology*, 45, 11-19.
- Arbel, Y., & Donchin, E. (2009). Parsing the componential structure of post - error ERPs: A principal component analysis of ERPs following errors. *Psychophysiology*, 46, 1179-1189.
- Asaoka, S., Masaki, H., Ogawa, K., Murphy, T. I., Fukuda, K., & Yamazaki, K. (2010). Performance monitoring during sleep inertia after a 1-h daytime nap. *Journal of Sleep Research*, 19, 436-443.
- Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 403-450.
- Aston-Jones, G., Shipley, M. T., Chouvet, G., Ennis, M., Van Bockstaele, E., Pieribone, V., Shiekhata, R., Akaoka, H., Drolet, G., Astier, B., Charléty, P., Valentino, R. J., & Williams, J. T. (1991). Afferent regulation of locus coeruleus neurons: anatomy, physiology and pharmacology. *Progress in Brain Research*, 88, 47-75.

- Badgaiyan, R. D., & Posner, M. I. (1998). Mapping the cingulate cortex in response selection and monitoring. *Neuroimage*, 7, 255-260.
- Balconi, M., & Crivelli, D. (2010). FRN and P300 ERP effect modulation in response to feedback sensitivity: The contribution of punishment-reward system (BIS/BAS) and behaviour identification of action. *Neuroscience Research*, 66, 162-172.
- Boksem, M. A. S., Tops, M., Kostermans, E., & De Cremer, D. (2008). Sensitivity to punishment and reward omission: Evidence from error-related ERP components. *Biological Psychology*, 79, 185-192.
- Boksem, M. A. S., Tops, M., Wester, A. E., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2006). Error-related ERP components and individual differences in punishment and reward sensitivity. *Brain Research*, 1101, 92-101.
- Bartels, A., & Zeki, S. (2004). The neural correlates of maternal and romantic love. *Neuroimage*, 21, 1155-1166.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25, 49-59.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 215-222.
- Carbonnell, L., & Falkenstein, M. (2006). Does the error negativity reflect the degree of response conflict? *Brain research*, 1095, 124-130.

- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Chen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747-740.
- Carver, C. S., & White, T. L. (1994). Behavioral Inhibition, behavioral activation, and affective responses to impending reward and punishment: The BIS/BAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 67, 319-333.
- Cavanagh, J. F., & Shackman, A. J. (2015). Frontal midline theta reflects anxiety and cognitive control: meta-analytic evidence. *Journal of Physiology-Paris*, 109, 3-15.
- Cavanna, A. E., & Trimble, M. R. (2006). The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*, 129, 564-583.
- Chiu, P. H., & Deldin, P. J. (2007). Neural evidence for enhanced error detection in major depressive disorder. *The American Journal of Psychiatry*, 164, 608-616.
- Coles, M. G., Scheffers, M. K., & Holroyd, C. B. (2001). Why is there an ERN/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing. *Biological Psychology*, 56, 173-189.
- Costa, P. T., & McCrae, R. R. (1992). *Neo personality inventory–revised (neo-pi-r) and neo five-factor inventory (neo-ffi) professional manual*. Odessa, Florida: Psychological Assessment Resources.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.

- Dikman, Z. V., & Allen, J. J. (2000). Error Monitoring during reward and avoidance learning in high- and low-socialized individuals. *Psychophysiology*, 37, 43-54.
- Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating. *Behavioral and Brain Sciences*, 11, 357-427.
- Elkins-Brown, N., Saunders, B., & Inzlicht, M. (2016). Error - related electromyographic activity over the corrugator supercilii is associated with neural performance monitoring. *Psychophysiology*, 53, 159-170.
- Endrass, T., Klawohn, J., Schuster, F., & Kathmann, N. (2008). Overactive performance monitoring in obsessive-compulsive disorder: ERP evidence from correct and erroneous reactions. *Neuropsychologia*, 46, 1877-1887.
- Endrass, T., Reuter, B., & Kathmann, N. (2007). ERP correlates of conscious error recognition: Aware and unaware errors in an antisaccade task. *European Journal of Neuroscience*, 26, 1714-1720.
- Endrass, Schuermann, B., Kaufmann, C., Spielberg, R., Kniesche, R., & Kathmann, N. (2010). Performance monitoring and error significance in patients with obsessive-compulsive disorder. *Biological Psychology*, 84, 257-263.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-149.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In: C. Brunia, A.

- Gaillard & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological brain research*, Tilburg University Press, Tilburg, pp. 192-195.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78, 447-455.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. (1995). Event-related potential correlates of errors in reaction tasks. In: G. Karmos, M. Molnar, V. Csepe, I. Czigler, & J. E. Desmedt (Eds.), *Perspective of event-related potentials research*, Elsevier, Amsterdam, pp. 287-296.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.
- Gehring, W. J., Coles, M. G., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1990). The error-related negativity: an event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology*, 27, S34.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological science*, 4, 385-390.
- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55, 468-484.
- Gray, J. A. (1970). The psychophysiological basis of introversion-extraversion. *Behaviour*



*Research and Therapy*, 8, 249-266.

Gray, J. R., Burgess, G. C., Schaefer, A., Yarkoni, T., Larsen, R. J., & Braver, T. S. (2005).

Affective personality differences in neural processing efficiency confirmed using fMRI. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 5, 182-190.

Groom, M. J., Liddle, E. B., Scerif, G., Liddle, P. F., Batty, M. J., Liotti, M., & Hollis, C. P.

(2013). Motivational incentives and methylphenidate enhance electrophysiological correlates of error monitoring in children with attention deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 54, 836-845.

Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. F. (2004). Error-related psychophysiology and negative affect. *Brain and cognition*, 56, 189-197.

Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, 42, 151-160.

Hewig, J., Coles, M. G., Trippe, R. H., Hecht, H., & Miltner, W. H. R. (2011). Dissociation of Pe and ERN/Ne in the conscious recognition of an error. *Psychophysiology*, 48, 1390-1396.

Holroyd, C. B., & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, 109, 679-709.

岩木信喜. (1998). 視覚性 GO/NO-GO 課題におけるエラー関連陰性電位と NO-GO 電位のオーバーラップ. *生理心理学と精神生理学*, 16, 77-84.

- Iannaccone, R., Hauser, T. U., Staempfli, P., Walitza, S., Brandeis, D., & Brem, S. (2015). Conflict monitoring and error processing: new insights from simultaneous EEG–fMRI. *Neuroimage*, 105, 395-407.
- Jodo, E., & Kayama, Y. (1992). Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82, 477-482.
- Klein, T. A., Endrass, T., Kathmann, N., Neumann, J., von Cramon, D. Y., & Ullsperger, M. (2007). Neural correlates of error awareness. *Neuroimage*, 34, 1774-1781.
- Leuthold, H., & Sommer, W. (1999). ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, 110, 342-357.
- Luu, P., Collins, P., & Tucker, D. M. (2000). Mood, personality, and self-monitoring: negative affect and emotionality in relation to frontal lobe mechanisms of error monitoring. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129, 43-60.
- 正木宏明・Gehring, W. J.・高澤則美・山崎勝男 (2004). エラー関連陰性電位-行動モニタリングとしての機能的意義. 生理心理学と精神生理学, 22, 3-18.
- Masaki, H., Murphy, T. I., Desjardins, J. A., & Segalowitz, S. J. (2012). The error-related negativity associated with different strength of stimulus-response interference. *Clinical Neurophysiology*, 123, 689-699.
- Masaki, H., & Segalowitz, S. J. (2004). Error negativity: A test of the response conflict versus error detection hypotheses. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors*,

*conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring.* Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Leipzig, pp. 76-83.

Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001).

Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human brain mapping*, 12, 131-143.

Moser, J. S., Hajcak, G., & Simons, R. F. (2005). The effects of fear on performance monitoring and attentional allocation. *Psychophysiology*, 42, 261-268.

Moser, J. S., Moran, T. P., Schroder, H. S., Donnellan, M. B., & Yeung, N. (2013). On the relationship between anxiety and error monitoring: a meta-analysis and conceptual framework. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 466.

Moser, J. S., Schroder, H. S., Heeter, C., Moran, T. P., & Lee, Y. H. (2011). Mind your errors evidence for a neural mechanism linking growth mind-set to adaptive posterror adjustments. *Psychological Science*, 22, 1481-1489.

Murphy, T. I., Richard, M., Masaki, H., & Segalowitz, S. J. (2006). The effect of sleepiness on performance monitoring: I know what I am doing, but do I care? *Journal of Sleep Research*, 15, 15-21.

Nieuwenhuis, S., Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Decision making, the P3, and the locus coeruleus--norepinephrine system. *Psychological bulletin*, 131, 510-532.

Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P. H., & Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response

- errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38, 752-760.
- O'Connell, R. G., Bellgrove, M. A., Dockree, P. M., Lau, A., Hester, R., Garavan, H., Fitzgerald, M., Foxe, J. J., & Robertson, I. H. (2009). The neural correlates of deficient error awareness in attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Neuropsychologia*, 47, 1149-1159.
- O'Connell, R. G., Dockree, P. M., Bellgrove, M. A., Kelly, S. P., Hester, R., Garavan, H., Robertson, I. H., & Foxe, J. J. (2007). The role of cingulate cortex in the detection of errors with and without awareness: a high-density electrical mapping study. *European Journal of Neuroscience*, 25, 2571-2579.
- Ogawa, K., Masaki, H., Yamazaki, K., & Sommer, W. (2011). The influence of emotions due to verbal admonishment and encouragement on performance monitoring. *Neuroreport*, 22, 313-318.
- Olvet, D. M., & Hajcak, G. (2009a). The effect of trial-to-trial feedback on the error-related negativity and its relationship with anxiety. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 9, 427-433.
- Olvet, D. M., & Hajcak, G. (2009b). The stability of error-related brain activity with increasing trials. *Psychophysiology*, 46, 957-961.
- Onton, J., Westerfield, M., Townsend, J., & Makeig, S. (2006). Imaging human EEG dynamics using independent component analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30, 808-822.

- Overbeek, T. J., Nieuwenhuis, S., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Dissociable components of error processing: On the functional significance of the Pe vis-à-vis the ERN/Ne. *Journal of Psychophysiology*, 19, 319-329.
- Pailing, P. E., & Segalowitz, S. J. (2004). The error-related negativity as a state and trait measure: Motivation, personality, and ERPs in response to errors. *Psychophysiology*, 41, 84-95.
- Patton, J. H., & Stanford, M. S. (1995). Factor structure of the Barratt impulsiveness scale. *Journal of Clinical Psychology*, 51, 768-774.
- Perrin, F., Bertrand, O., & Pernier, J. (1987). Scalp current density mapping: value and estimation from potential data. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 34, 283-288.
- Pfefferbaum, A., Ford, J. M., Weller, B. J., & Kopell, B. S. (1985). ERPs to response production and inhibition. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 60, 423-434.
- Potts, G. F. (2011). Impact of reward and punishment motivation on behavior monitoring as indexed by the error-related negativity. *International Journal of Psychophysiology*, 81, 324-331.
- Potts, G. F., George, M. R. M., Martin, L. E., & Barratt, E. S. (2006). Reduced punishment sensitivity in neural systems of behavior monitoring in impulsive individuals. *Neuroscience letters*, 397, 130-134.

- Rabbitt, P. M. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 264-272.
- Ridderinkhof, K. R., Ramautar, J. R., & Wijnen, J. G. (2009). To PE or not to PE: A P3 - like ERP component reflecting the processing of response errors. *Psychophysiology*, 46, 531-538.
- Ridderinkhof, K. R., Van Den Wildenberg, W. P., Segalowitz, S. J., & Carter, C. S. (2004). Neurocognitive mechanisms of cognitive control: the role of prefrontal cortex in action selection, response inhibition, performance monitoring, and reward-based learning. *Brain and cognition*, 56, 129-140.
- Riesel, A., Weinberg, A., Endrass, T., Kathmann, N., & Hajcak, G. (2012). Punishment has a lasting impact on error-related brain activity. *Psychophysiology*, 49, 239-247.
- Rochet, N., Spieser, L., Casini, L., Hasbroucq, T., & Burle, B. (2014). Detecting and correcting partial errors: Evidence for efficient control without conscious access. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 14, 970-982.
- Roger, C., Bénar, C. G., Vidal, F., Hasbroucq, T., & Burle, B. (2010). Rostral cingulate zone and correct response monitoring: ICA and source localization evidences for the unicity of correct-and error-negativities. *Neuroimage*, 51, 391-403.
- Santesso, D. L., & Segalowitz, S. J. (2009). The error-related negativity is related to risk taking and empathy in young men. *Psychophysiology*, 46, 143-152.
- Scheffers, M. K., Coles, M. G., Bernstein, P., Gehring, W. J., & Donchin, E. (1996).

- Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and No-go stimuli. *Psychophysiology*, 33, 42-53.
- Scherg, M., & Berg, P. (1990). BESA-Brain electric source analysis handbook. Munich: Max-Planck Institute for Psychiatry.
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., Reiss, A. L., & Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *The Journal of Neuroscience*, 27, 2349-2356.
- Shalgi, S., Barkan, I., & Deouell, L. Y. (2009). On the positive side of error processing: error-awareness positivity revisited. *European Journal of Neuroscience*, 29, 1522-1532.
- Shenhav, A., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2013). The expected value of control: an integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, 79, 217-240.
- Steinhauser, M., & Yeung, N. (2012). Error awareness as evidence accumulation: effects of speed-accuracy trade-off on error signaling. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 240.
- Stürmer, B., Nigbur, R., Schacht, A., & Sommer, W. (2011). Reward and punishment effects on error processing and conflict control. *Frontiers in Psychology*, 2, 335.
- Swick, D., Pineda, J. A., & Foote, S. L. (1994). Effects of systemic clonidine on auditory event-related potentials in squirrel monkeys. *Brain Research Bulletin*, 33, 79-86.
- 高橋雄介・山形伸二・木島伸彦・繫榊算男・大野裕・安藤寿康 (2007). Gray の気

質モデル—BIS/BAS 尺度日本語版の作成と双生児法による行動遺伝学的検討  
パーソナリティ研究, 15, 276-289.

Tanaka, H. (2009). Error positivity is related to attentional control of task switching.  
*NeuroReport*, 20, 820-824.

Tops, M., Koole, S. L., & Wijers, A. A. (2013). The Pe of perfectionism. *Journal of Psychophysiology*, 27, 84-94.

Torrubia, R., Avila, C., Moltó, J., & Caseras, X. (2001). The Sensitivity to punishment and sensitivity to reward questionnaire (SPSRQ) as a measure of Gray's anxiety and impulsivity dimensions. *Personality and Individual Differences*, 31, 837-862.

Ullsperger, M., & Szymanowski, F. (2004). ERP correlates of error relevance. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, conflicts, and the brain: Current opinions on performance monitoring*. Max Planck Institute of Cognitive Neuroscience, Leipzig, pp. 171-176.

Ullsperger, M., Danielmeier, C., & Jocham, G. (2014). Neurophysiology of performance monitoring and adaptive behavior. *Physiological Reviews*, 94, 35-79.

Ullsperger, M., Harsay, H. A., Wessel, J. R., & Ridderinkhof, K. R. (2010). Conscious perception of errors and its relation to the anterior insula. *Brain Structure and Function*, 214, 629-643.

van Boxtel, G. J., van der Molen, M. W., & Jennings, J. R. (2005). Differential involvement of the anterior cingulate cortex in performance monitoring during a stop-signal task.



*Journal of Psychophysiology*, 19, 1-10.

van Veen, V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593-602.

Vidal, F., Burle, B., Bonnet, M., Grapperon, J., & Hasbroucq, T. (2003). Error negativity on correct trials: a reexamination of available data. *Biological Psychology*, 64, 265-282.

Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. (2000). Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological Psychology*, 51, 109-128.

Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54, 1063-1070.

Weinberg, A., Luhmann, C. C., Bress, J. N., & Hajcak, G. (2012). Better late than never? The effect of feedback delay on ERP indices of reward processing. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 12, 671-677.

Yeung, N., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error detection: conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological review*, 111, 931-959.